



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

NIKO JÄRVELÄ

KOLLOIDISTEN SUSPENSIOIDEN ANALYSOINTILAITTEEN VASTEEN LÄM-
PÖTILAKOMPENSOINTI

Diplomityö

Tarkastaja: professori Matti Vilkkö
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
tekniikan tiedeiden tiedekunnan de-
kaanin päätöksellä 1.3.2017

TIIVISTELMÄ

NIKO JÄRVELÄ: Kolloidisten suspensioiden analysointilaitteen vasteen lämpötilakompensointi

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 48 sivua

Maaliskuu 2017

Automaatiotekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Prosessien hallinta

Tarkastaja: professori Matti Vilkkö

Avainsanat: kompensointi, lämpötilakompensointi, taajuusvasteen mallinnus, radiaalikantafunktioverkko

Prosessit kohtaavat erilaisia häiriöitä, jotka vaikuttavat niiden toimintaan. Häiriöt ovat jonkin ulkoisen tekijän, esimerkiksi lämpötilan, kosteuden tai likaantumisen, aiheuttamia ei toivottuja muutoksia prosessoitavassa materiaalissa, prosessointilaitteissa tai prosessia mittaavissa antureissa. Häiriön vaikutus pyritään poistamaan eli kompensoimaan, jotta häiriön kohde toimisi normaalisti.

Tässä työssä tutkitaan kolloidisten suspensioiden analysointiin kehitetyn mittalaitteen vastetta ja sen lämpötilariippuvuutta. Mittalaite tuottaa vasteena taajuusvasteen mitattavasta nesteestä, eli materiaalivasteen. Nesteiden lämpötila vaikuttaa voimakkaasti vasteeseen ja tässä työssä muodostetaan matemaattinen malli lämpötilan vaikutuksen poistamiseksi vasteesta. Lisäksi tutkitaan erilaisten nesteiden vasteita ja niiden käyttäytymisen eroavaisuuksia lämpötilan funktiona.

Taajuusvasteiden lämpötilakompensointiin käytetään kolmea eri menetelmää. Yksinkertaisin menetelmä on vakiokertoimien käyttö taajuusvasteesta laskettujen piirteiden siirtämiseen lämpötilasta toiseen. Tämän lisäksi taajuusvasteita mallinnetaan käyttäen radiaalikantafunktioverkkoa ja muodostamalla taajuusvasteista siirtofunktioita. Radiaalikantafunktioverkkojen ja siirtofunktioiden kertoimille muodostetaan sovitteita lämpötilan funktiona. Näiltä sovitteilta voidaan muodostaa uusi taajuusvaste halutussa lämpötilassa.

Menetelmiä vertaillaan kolmessa kokeessa. Kokeiden perusteella siirtofunktio menetelmä, jossa käytetään kolmea napaa ja kahta nollaa antaa yleisesti tarkimman kompensointituloksen. Kuitenkin riippuen käytettävistä nesteistä voidaan myös jollain toisella menetelmällä päästä tietyissä tapauksissa hieman parempiin tuloksiin. Tulokset osoittavat, että matemaattisen mallin avulla mittalaitteen vasteesta pystytään lämpötilan vaikutus poistamaan lähes kokonaan.

ABSTRACT

NIKO JÄRVELÄ: Temperature Compensation of Colloidal Suspensions Analyzer
Tampere University of Technology
Master of Science Thesis, 48 pages
March 2017
Master's Degree Programme in Automation Science and Engineering
Major: Process Control
Examiner: Professor Matti Vilkkio

Keywords: compensation, curve fitting, temperature compensation, frequency response modelling, radial basis function network

Industry process encounter various disturbances that affect the performance of the process. Disturbances are caused by external factors, such as temperature, humidity or contamination. These disturbances lead to unwanted changes in processed materials, processing devices or sensors measuring the process. Eliminating the effects of disturbances is crucial so that the process can operate normally.

In this thesis, the response of colloidal suspensions analyzer and its temperature dependency is studied. The measuring device produces a frequency response from the measured fluid. Temperature of the fluid strongly affects the response and therefore a mathematical model for temperature compensation is presented. In addition, various fluid responses and behavioral differences as a function of temperature are studied.

To compensate for the frequency responses temperature three methods are proposed. First and simplest method is to use constant factors when projecting the frequency responses calculated features between temperatures. The second method is based on radial basis function network and the third method is based on transfer functions. In the last two methods, frequency responses are modeled as a function of temperature and the response in the desired temperature can be calculated from the model.

The methods were tested with three experiments. Based on the experiments a transfer function method with three poles and two zeros generally gives the most precise compensation results. However in certain cases some other methods can give more precise results. The experiments show that temperature compensation from frequency response can be reliably accomplished using mathematical models.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on osa Tampereen teknillisessä yliopistossa tehtävää tutkimusprojektia ”Tutkimuksesta uutta tietoa ja liiketoimintaa”. Projektin tehdään yhteistyössä Systeemi-tekniikan ja Materiaaliopin laitosten välillä. Tarkoituksena on edistää tutkimusprojektissa kehitettyä ja tutkittua Collo-mittalaitteen käytettävyyttä eri lämpötilojen välillä. Suurimpana rahoittajana tutkimusprojektissa on toiminut teknologian ja innovaatioiden kehittämisskeskus Tekes.

Erityiskiitokset haluan esittää työn ohjaajana toimineelle professori Matti Vilkolle asiantuntevasta ohjauksesta. Lisäksi haluaisin kiittää samassa projektissa työskenteleville Teemu Yli-Hallilalle sekä Matti Järveläiselle hyvistä vinkeistä, ohjeista ja suuresta avusta omalta osaltaan diplomityöni tekemisessä. Lopuksi haluaisin kiittää vielä perhettä ja Veeraa koko opiskeluajan kestäneestä kannustuksesta.

Tampereella, 21.3.2017

Niko Järvelä

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	TEORIA	4
2.1	Kolloidiset suspensiot	4
2.2	Siirtofunktiomallit ja taajuusvaste.....	4
2.3	Värähtelypiiri	7
3.	LÄMPÖTILANKOMPENSOINNIN KÄYTETYT METODIT JA MATERIAALIT	10
3.1	Mallinnus.....	11
3.2	Lämpötilan kompensointi.....	14
3.3	Suora muutoskompensointi	15
4.	KOEJÄRJESTELYT JA KOETULOSTEN MALLINNUS.....	16
4.1	Koemittaukset.....	16
4.2	Taajuusvaste lämpötilan funktiona.....	17
4.3	Mallinnus.....	19
4.4	Kompensointi	24
5.	MITTAUSTULOKSIEN TARKASTELU	28
5.1	Mallinnusmetodien vertailu	28
5.2	Kompensointimenetelmien vertailu	33
6.	YHTEENVETO	44
	LÄHTEET.....	48

LYHENTEET JA MERKINNÄT

a	Amplitudi
C	Kapasitanssi
$d(f)$	Radiaalikantafunktioverkon vastesignaali
f	Taajuus
f_c	Taajuusvasteen kuopan keskitaajuus
f_H	Ylempi rajataajuus
f_L	Alempi rajataajuus
f_r	Resonanssitaajuus
$G(s)$	Siirtofunktio
$G_c(s)$	Lämpötilakompensoitu siirtofunktio
$G_m(s)$	Kompensoitava siirtofunktio
$G(e^{j\omega})$	Taajuusvaste
$H_T(s)$	Kompensointisiirtofunktio lämpötilassa T
L	Induktanssi
R	Resistanssi
R_i	Kantafunktio
t	Aika
$u(t)$	Herätesignaali
$y(t)$	Vastesignaali
φ	Vaihesiirto
ω	Kulmanopeus
kok	Sovitteen laskennassa käytetty kokonaisia siirtofunktioita
lkm	Lukumäärä
BWG	Band Width Gain -piirre
FG	Frequency Gain -piirre
RBFN	Radiaalikantafunktioverkko (engl. Radial Basis Function Network)
TTY	Tampereen teknillinen yliopisto
TUTL	Tutkimuksesta uutta tietoa ja liiketoimintaa
yks	Sovitteen laskennassa käytetty yksittäisiä kertoimia

1. JOHDANTO

Alati kasvava kilpailu ja raaka-aineiden niukkuus asettavat haasteensa nykymaailman teollisuudelle. Sen vuoksi on tärkeää hyödyntää saatavilla olevat raaka-aineet mahdollisimman tehokkaasti. Prosessiteollisuus tarvitsee kehittymisensä tueksi koko ajan uusia ja entistä tehokkaampia sekä tarkempia mittausten menetelmiä muun muassa raaka-aineiden käytön optimoimiseksi. On olemassa paljon asioita ja ilmiöitä, joita ei vielä pystytä täysin havaitsemaan tai mittaamaan nykyisillä mittausten menetelmillä. Tällaisten ilmiöiden tutkiminen ja niihin mittausten menetelmien kehittäminen on tärkeää prosessien kehityksen kannalta. Uusien menetelmien avulla pystytään mittaamaan, säätämään ja ohjaamaan prosesseja entistä tehokkaammin. Tehostettu prosessi pystyy hallitsemaan raaka-aineiden laadun epätasaisuutta paremmin, mikä johtaa materiaalihäviöiden pienenemiseen. Uudet menetelmät mahdollistavat myös prosessointiaikojen lyhentämisen ja säästynyt aika luonnollisesti parantaa kannattavuutta.

Prosessit kohtaavat erilaisia häiriöitä, jotka vaikuttavat niiden toimintaan. Häiriöt ovat jonkin ulkoisen tekijän, esimerkiksi lämpötilan, kosteuden tai likaantumisen, aiheuttamia ei toivottuja muutoksia prosessoitavassa materiaalissa, prosessointilaitteissa tai prosessia mittaavissa antureissa. Nämä häiriöt ovat syy siihen, että prosesseja ohjataan ja säädetään erilaisin menetelmin. Häiriön vaikutus pyritään poistamaan eli kompensoimaan, jotta häiriön kohde toimisi normaalisti.

Kolloidiset [1] suspensiot [2] ovat yksi teollisuudessa laajasti prosessoitava seostyyppi. Suspensioita käsitellään aina keraamiteollisuudesta lääketieteeseen ja siksi niiden käsittelyn tehostaminen on oleellinen osa prosessien kehitystä. Nykyiset teolliset suspensioiden mittaamiseen rakennetut laitteet voidaan jakaa kahteen perustyyppiin: online- ja laboratoriolaitteisiin. Laitteiden käyttämät mittausten menetelmät vaihtelevat suuresti. Jokaisella menetelmällä on oma erikoisalueensa ja mitattava suure, missä ne toimivat parhaiten. Online-mittalaitteita on markkinoilla suhteessa vähemmän kuin laboratoriolaitteita. [3] Juurikin onlinelaitteet ovat prosessien mittaamisessa ja säätämisessä avainasemassa, koska niiden avulla saadaan reaaliaikaista informaatiota prosessin tilasta.

Tampereen teknillisellä yliopistolla (TTY) on tutkittu eri aineiden mittaamista sähköisellä taajuusvastamenetelmällä. Yli-Hallila [4] tutki diplomityössään huokoisten alumiinioksidien permittiivisyyden muutoksia taajuusvasteesta. Taajuusvaste muodostettiin käyttäen sähköistä monitaajuussignaalia. Junnila [5] mallinsi diplomityössään huokoisten keraamien dielektrisyyttä ja niin ikään muodosti taajuusvasteita sähköisellä herätteellä. Sepälä [6] tutki diplomityössään keraamien ainettarikkomatonta karakterisointia taajuusvas-

temenetelmillä. Kuten edelle mainituissa myös tässä työssä mitataan materiaalista taajuusvasteita. Mittaamiseen käytetään resonaattoriipiiriä. Käytetty tekniikka perustuu sähköisen resonaattoriipiirin vaikutuksiin kolloidipartikkelien rajapintojen varauksissa ja samalla mitataan rajapintojen vaikutusta resonanssiin. [7] Projektin luonteen ja mittalaitetta koskevien immateriaalioikeuksien takia mittalaitteen tekniikkaa ei käsitellä tässä työssä kovin syvällisesti.

Lämpötila vaikuttaa mitattavan aineen sähköisiin ominaisuuksiin [8] [9] ja siten saatava vaste riippuu myös lämpötilasta. Prosessiteollisuudessa materiaalien lämpötilan pitäminen vakiona läpi prosessin ei ole monesti tarpeellista tai aina edes mahdollista. Esimerkiksi maalista voidaan sähköisellä resonaattoriin perustuvalla mittaussmenetelmällä mitata kiinnostavia suureita kuten kiintoainepitoisuutta tai käytettävien apuaineiden määrää. Maalin valmistuksen aikana tapahtuva lämpötilavaihtelu aiheuttaa mittaustulokseen häiriötä ja siksi lämpötilan vaikutusta täytyy kompensoida laskennallisesti. Tässä työssä ei pyritä ottamaan kantaa siihen, miksi mitattavan nesteen sähköiset ominaisuudet muuttuvat lämpötilan mukana. Sen sijaan tutkitaan miten lämpötila vaikuttaa saatavaan vasteeseen. Mitatuista vasteista pyritään muodostamaan matemaattinen malli, jolla lämpötilan vaikutus pystytään laskennallisesti poistamaan vasteesta. Lisäksi tutkitaan vaikuttaako lämpötila eri tavalla erilaisissa nesteissä ja voidaanko muodostettua mallia soveltaa erilaisten nesteiden lämpötilakompensointiin.

Mittalaitteissa käytetään paljon erilaisia taulukoituja korjauskertoimia, joilla voidaan siirtää jokin arvo halutulle toiminta-alueelle. [10] [11] Nämä kertoimet ovat usein johonkin prosessin toimintapisteeseen optimoidut, eivätkä ne ota prosessin dynamiikkaa huomioon juuri laisinkaan. Gupta [12] hyödynsi lopputyössään polynomisovitteita sähkömoottorin parametrien määrittämisessä. Työssä vertailtiin matemaattisesti mallinnetun ja reaali ilman moottorin vasteita ja polynomisovitteiden avulla määriteltiin moottorin mekaaniset parametrit. Ganley et al. [13] tutkivat ioni polymeeri-metalli komposiitti anturin dynamiikan riippuvuutta lämpötilasta. Kokeissa tutkittiin anturin elastista värähtelyä ja vasteista muodostettiin taajuusvastekuvaajia eri lämpötiloissa. Muodostetuista taajuusvasteista eri lämpötiloissa mallinnettiin siirtofunktiot ja siirtofunktioiden välille muodostettiin sovite lämpötilan funktiona.

Tässä työssä vertaillaan edellä esitettyjä menetelmiä matemaattisen mallin muodostamisessa lämpötilan kompensoimiseksi taajuusvasteesta. Polynomisovitteita hyödynnettiin muodostamalla Gaussin käyrään perustuva radiaalikantafunktioverkko (engl. Radial Basis Function Network, RBFN) [14]. RBFN:n kertoimista muodostettiin Ganley et al. esittelemän metodin ideaa hyväksi käyttäen matemaattinen malli lämpötilan funktiona. Ganleyn esittelemää metodia käytettiin sellaisenaan ja sitä myös jatkokehitettiin vastaamaan paremmin mallinnettavan datan ominaisuuksia.

Työssä vertaillaan, miten eri menetelmät soveltuvat lämpötilan kompensoimiseen mitattusta taajuusvasteesta. Mallien muodostamista ja testaamista varten suoritettiin koemittauksia. Mittalaitteena kokeissa käytettiin kolloidisten suspensioiden analysointiin kehitettyä Collo-mittalaitetta [15]. Kokeissa käytettiin nesteinä Paulig Juhla Mokka vaalea ja tummapaahdokahveja sekä auringonkukkaöljyä. Käytetyt nesteen eivät täysin täytä kolloidisen suspension määritelmää, mutta lämpötilanvaikutus mittaustulokseen on samankaltainen kuin kolloidisilla suspensioilla. Eri näytteistä muodostettuja malleja vertailtiin kompensoimalla toisia näytteitä niiden avulla haluttuun lämpötilaan. Esimerkiksi auringonkukkaöljystä muodostetulla mallilla kompensoitiin vaaleapaahdoista kahvia. Kokeilla haluttiin selvittää, miten tarkka kompensointi tulos on, kun malli on muodostettu nesteestä, jonka sähköiset ominaisuudet ovat samanlaiset tai erilaiset kuin kompensoitavan nesteen. Kokeiden yhteydessä myös selvitettiin, pystytäänkö mittalaitteella erottelemaan tumma- ja vaaleapaahtoinen kahvi toisistaan.

Tämän diplomityön toisessa luvussa käsitellään tarkemmin teoreettiset lähtökohdat, kuten suspensiot, käytettävän mittalaitteen tekniikka ja taajuusvaste. Luvussa kolme esitellään kaikki käytettävät metodit ja niiden teoria. Luvussa neljä käydään läpi koejärjestelyt ja suoritettut mittaukset. Saadut mittaustulokset käsitellään luvussa viisi.

2. TEORIA

2.1 Kolloidiset suspensiot

Kolloidiksi kutsutaan erään määritelmän mukaan ympäröivään väliaineeseen sekoittunutta ainetta, joka koostuu erittäin pienistä hiukkasista. Näiden hiukkasten vähintään yhden dimension koko on karkeasti yhden nanometrin ja yhden mikrometrin välissä. Tätä määritelmään kuitenkin voidaan laajentaa keskittyen tarkemmin partikkeleiden välisiin vuorovaikutuksiin. Kolloidiset partikkelit ovat suurempia kuin molekyylit, joten ne eivät käyttäydy kuten atomit ja molekyylit klassisessa kemiassa. Toisaalta partikkelit ovat kuitenkin niin pieniä, että eivät käyttäydy kuten makroskooppiset partikkelit klassisessa fysiikassa. Toisin sanoen partikkelit ovat niin pieniä, että eivät esimerkiksi sedimentoidu tavalliseen tapaan, koska sähköiset voimat ovat painovoimaa suurempia. [2] Aineen kemiallisella koostumuksella, rakenteella tai faasilla ei ole merkitystä siihen onko tarkasteltavat partikkelit kolloideja. [1]

Materialla on kolme perinteistä olomuotoa: kiinteä, neste ja kaasu. Kolloidi koostuu väliaineeseen jakautuneesta aineesta. Jokainen olomuoto voi olla väliaineena ja väliaineeseen dispergoituneena aineena. Erilaiset kolloidit voidaan luokitella sen perusteella mikä on väliaineen ja mikä dispergoituneen aineen olomuoto. Esimerkiksi jos kolloidissa väliaineena on kaasu ja siihen dispegoitunut neste, kutsutaan sitä aerosoliksi (esimerkiksi sumu). Kun taas väliaineena on neste ja siihen on dispergoitunut kiinteitä partikkeleita, kutsutaan kolloidia suspensioiksi (esimerkiksi maali). [1] Suurin osa suspensioista koostuu kiinteistä partikkeleista dispergoituneena vesiliuosfaasiin, kuitenkin joissain nestefaasina on myös öljy. [2]

2.2 Siirtofunktiomallit ja taajuusvaste

Malli on matemaattinen esitys jostain fyysisestä, biologisesta tai informatiivisesta systeemistä. Malli on approksimaatio todellisesta systeemistä ja sen avulla voidaan ennustaa, miten systeemi käyttäytyy erilaisilla herätteillä. Mallit voidaan jakaa fysikaalisiin [16] ja datapohjaisiin malleihin [17]. Fysikaaliset mallit muodostetaan systeemiä kuvaavista taseyhtälöistä. Datapohjaiset mallit taas muodostetaan systeemiin syötettyjen herätteiden ja siitä mitattujen vasteiden avulla. Dynaamiset mallit voidaan jakaa myös aikajatkuviin ja diskreetti aikaisiin malleihin. Diskreetti aikaisessa mallissa laskenta suoritetaan tietyn välein eli askelein, kun taas aikajatkuvassa mallissa jokainen ajanhetki on määriteltävissä. Reaalimaailmassa fysikaaliset suuret ovat aikajatkuvia. Kuitenkin prosessista tehdyt mitaukset ovat aina diskreettejä ja tietokonelaskenta tapahtuu diskreetisti.

Systeemien dynaamista käyttäytymistä voidaan kuvata muun muassa taajuusvasteilla ja siirtofunktiolla. Siirtofunktio on lineaarisen systeemin herätteen ja vasteen suhde. Lineaarilla systeemillä tarkoitetaan systeemiä, jonka heräte, vaste sekä näiden suhde ovat kaikki lineaarisia. Taajuustasossa esitettyä siirtofunktiota taas kutsutaan taajuusvasteeksi. [18] Tässä työssä taajuusvasteet esitetään bode-diagrammien avulla, koska se on usein selvin esitystapa. Bode-diagrammissa vahvistus esitetään desibeliasteikolla ja x-akselin taajuudet ovat logaritmisena. [16] [19] Taajuustasossa signaalit kuvataan kompleksiluvuilla. Kompleksiluvun itseisarvo kuvaa signaalin amplitudia ja kulma vaihetta. Tässä työssä tutkitaan mittalaitteelta saatavaa taajuusvastetta, eli mittaussiirin tuottamaa vahvistusta ja vaihesiirtoa taajuuden funktiona ja muodostetaan siitä datapohjainen aikajatkuvuus malli.

2.2.1 Siirtofunktiot

Lineaarisen systeemin siirtofunktio voidaan esittää aikatasossa, Laplace-tasossa tai taajuustasossa. [16] Yleisessä muodossa Laplace-tasossa siirtofunktio on

$$G(s) = \frac{b_ms^m + b_{m-1}s^{m-1} + \dots + b_1s + b_0}{a_ns^n + a_{n-1}s^{n-1} + \dots + a_1s + a_0}, \quad (1)$$

missä $s = j\omega$, ω ollessa kulmataajuus ja $j = \sqrt{-1}$. Indeksit m ja n ovat ei-negatiivisia kokonaislukuja, jotka määrittävät osoittaja- ja nimittäjäpolynomien asteluvut. Kertoimien $\{b_i\}_{i=0}^m$ ja $\{a_i\}_{i=0}^n$ arvot riippuvat systeemin dynamiikasta eli tässä yhteydessä muun muassa lämpötilasta. Supistamattoman siirtofunktion nimittäjäpolynomin juuret, eli nollakohdat, ovat systeemin napoja ja osoittajapolynomin juuret nollija. Nollija ja napoja on yksi vähemmän kuin systeemin siirtofunktiossa vastaavasti on kertoimia b ja a . Yleensä siirtofunktio supistetaan muotoon, missä kertoimen a_n arvo on yksi. [16]

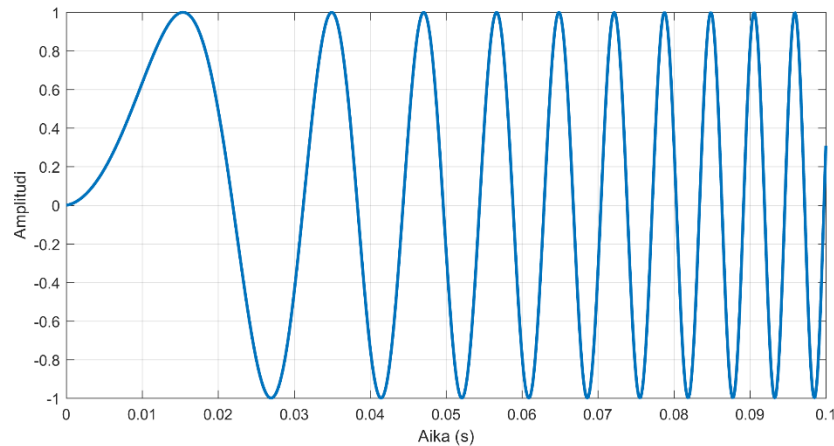
2.2.2 Taajuusvasteen kokeellinen määrittäminen taajuuspyyhkäisyllä

Datapohjaisilla malleilla taajuusvasteen kokeelliseen määrittämiseen on olemassa monta tapaa. Yksinkertaisin tapa on testata järjestelmää eri taajuisilla siniheränteillä. Taajuusvasteen kokeellisessa määrittämisessä testattava systeemi voi olla ennalta täysin tuntematon. Systeemin dynamiikan selvittämiseksi siihen syötetään sinimuotoinen heräte, joka voidaan kirjoittaa muodossa

$$u(t) = a \cos(\omega t), \quad (2)$$

missä a on siniaallon amplitudi, ω on kulmanopeus ja t on aika. Lineaarisen systeemin tuottama vaste on konvoluution avulla esitettyä

$$y(t) = g(t) * u(t), \quad (3)$$



Kuva 2-1: Taajuuspyyhkäisyn havainnollistus

missä g on systeemin impulssivaste. Kun systeemiin syötetään yhtälön (2) mukaista sinimuotoista herätettä on vaste transienttivaiheen jälkeen saman taajuista sinivärähtelyä. Kuitenkin systeemin dynamiikasta johtuen värähtelyn amplitudi ja vaihekulma ovat muuttuneet. [19] Kun systeemin impulssivastefunktio vielä Laplace-muunnetaan siirtofunktioksi, on systeemin tuottama vaste

$$y(t) = a|G(j\omega)| \cos(\omega t + \varphi), \quad (4)$$

missä

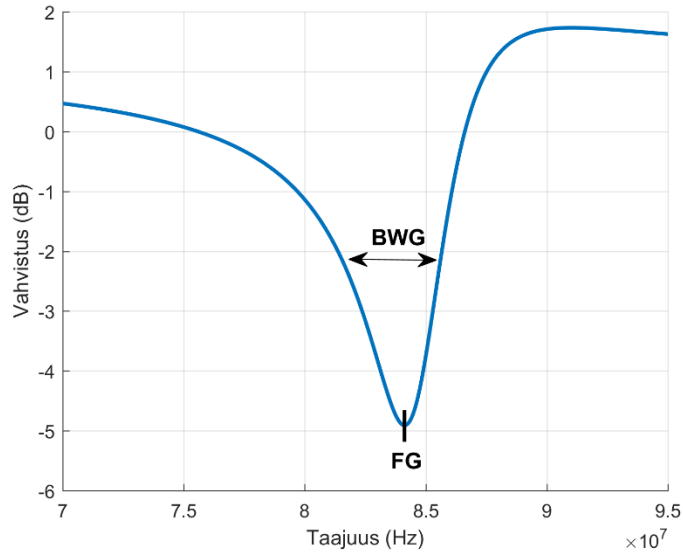
$$\varphi = \arg(G(j\omega)) \quad (5)$$

Mittaamalla vaste eri taajuisilla siniherätteillä saadaan systeemin vahvistus ja vaihesiirto määritettyä eri taajuuksilla ja siten taajuusvaste muodostettua. Sinisignaaleilla taajuusvasteen kokeellinen määrittäminen on yksinkertaista. Menetelmä soveltuu paremmin suurille kuin pienille taajuuksille. Pienet taajuudet tarvitsevat paljon enemmän aikaa yhden jakson esittämiseen signaalista ja sen vuoksi pienien taajuuksien taajuusvasteen määrittäminen tällä menetelmällä on hidasta.

Kokeissa käytetty mittalaite käyttää sille määritellyn taajuusalueen mittaamiseen taajuuspyyhkäisyä. Taajuuspyyhkäisyssä koko taajuusalue mitataan yhdellä signaalilla, joka sisältää halutut sinimuotoiset taajuudet. Herätesignaalin muutos taajuuksien välillä voi olla esimerkiksi lineaarista, neliöllistä, logaritmista tai diskreettiä. Kuva 2-1 esittää esimerkkinä lineaarisen taajuuspyyhkäisyn, jossa signaalin sinivärähtelyn taajuus kasvaa tasaisesti.

2.2.3 Taajuusvasteen tunnusluvut

Taajuustasossa esitettävää siirtofunktiota sanotaan taajuusvasteeksi. Käytettävä mittalaite mittaa mittapään taajuusvasteen, kun mittapään kapasitanssiin vaikuttaa sen lähettyvillä



Kuva 2-2: Taajuusvasteen vahvistuksen kuvaaja sekä BWG ja GF piirteet.

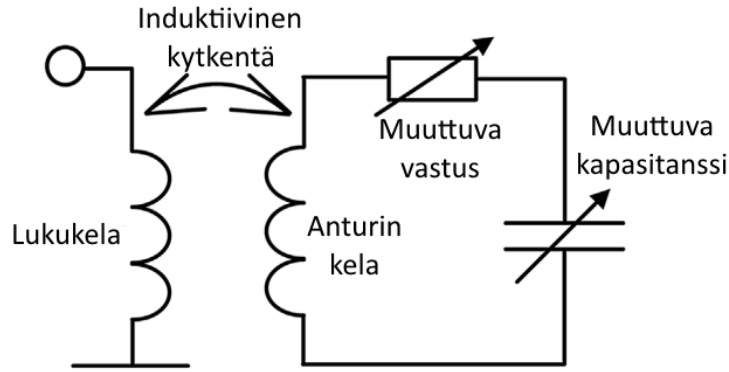
oleva materiaali eli mittalaite tuottaa materiaalivasteen. Materiaalivaste on nesteen aiheuttama muutos vastesignaaliin, eli sillä voidaan kuvata materiaalin ominaisuuksia. Nesteestä mitatusta materiaalivasteesta lasketaan tunnuslukuja eli piirteitä, joilla on linkkejä sen eri ominaisuuksiin. [20]

Taajuusvasteen vahvistuksen kuvaaja on esitetty kuvassa 2-2. Kuvaan on merkattu kohdat, mistä piirteiden *Band Width Gain* (BWG) ja *Frequency Gain* (FG) arvot määritetään. FG on vahvistuksen piikin minimikohdan taajuuden arvo. BWG on piikin rajaama kaistanleveys. BWG voidaan periaatteessa laskea miltä kohdalta tahansa, mutta tässä työssä on käytetty kohtaa, missä vahvistuksen arvo on sama kuin piikin minimiarvon vahvistus jaettuna $\sqrt{2}$. Tämä menetelmä jäljittelee prosessin tyypillistä -3dB kaistanleveyden määrittämistä. FG:n arvoon vaikuttaa suuresti mitattavan nesteen suhteellinen permittiivisyys. Resonaattorin häviöt ja nesteen dielektriset häviöt taas vaikuttavat suuresti BWG-arvon suuruuteen. Lasketuilla piirteillä voi olla myös pieni riippuvuus toisistaan. [7]

2.3 Värähtelypiiri

Mittauksissa käytetty laite perustuu sähköiseen värähtelypiiriin. Anturina toimii passiivinen LC-resonanssiapiiri. Anturilla mitattava neste on osa mittaussiipiä, joten yksinkertaistettuna mittaussiipi voidaan mallintaa RLC-piirinä, jonka taajuusvastetta mitataan. Värähtelypiirillä on taipumus värähdellä sille ominaisella resonanssitaajuudella, joka RLC-piirille voidaan laskea

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad (6)$$



Kuva 2-3: Anturin mittauspiirin kytkentä, muokattu lähteestä [7].

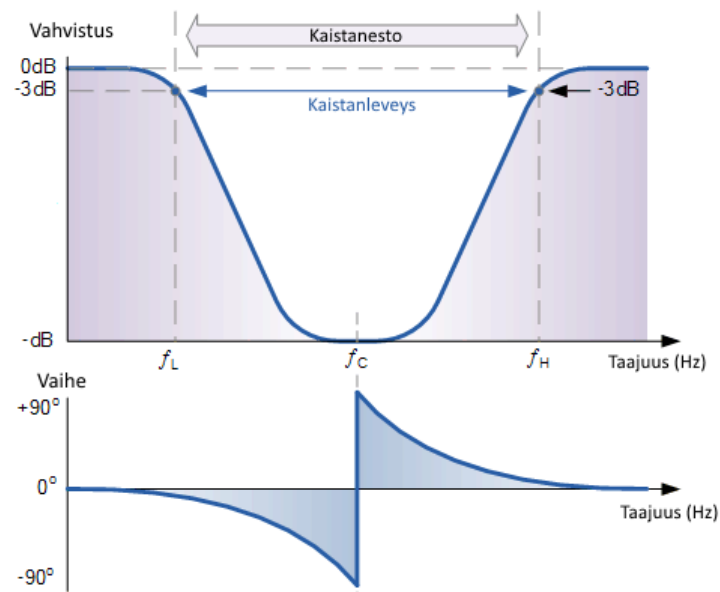
missä C on kapasitanssi ja L induktanssi. Piirin resistanssi R ei siis vaikuta resonanssitaajuuteen, mutta resonanssiinkin muotoon sillä on vaikutus.

Kuva 2-3 esittää anturin mittauspiirin kytkennän. Mittauspiirissä lukukelan muodostama magneettikenttä indusoi virran mittakelalle, joka muodostaa sähkökentän resonanssipiirin kondensaattoriin. Muodostunut sähkökenttä läpäisee osittain myös mitattavan nesteen. Permittiivisyyden muutokset nesteessä vaikuttavat vastaavasti anturin kapasitanssiin ja täten mittauspiirin resonanssiin. Lisäksi systeemin kompleksinen permittiivisyys aiheuttaa häviöitä, jotka voidaan mitata.

Kytkenässä sarjaresonaattoriipiiri on rinnankytkettynä induktiivisella kelalla. Rinnankytkettynä sarjaresonaattoriipiiri toimii kaistanestosuodattimena. Kaistanestosuodatin vaihmentaa voimakkaasti tietyllä taajuuskaistalla olevat taajuudet, mutta päästää muut taajuudet läpi. Anturin kytkennän mukainen siirtofunktio on [21]

$$H(s) = \frac{s^2 + \frac{1}{LC}}{s^2 + \frac{R}{L}s + \frac{1}{LC}}, \quad (7)$$

Yhtälön (7) mukaisesti kaistanestosuodin on toisen asteen systeemi. Toisin sanoen, sen nimittäjäpolynomilla on kaksi juurta, jotka ovat myös systeemin navat. Systeemillä on siten myös kaksi rajataajuutta, jotka määrittävät suodatettavan kaistan. Kuvassa 2-4 on kaistanestosuotimen teoreettinen taajuusvaste. Suodatettavan kaistan määrittävät -3 dB rajataajuudet f_L ja f_H . Näissä pisteissä suodatettavan signaalin teho on puolet sen alkupe-
räisestä voimakkuudesta. Kaistanestosuodin päästää läpi kaikki taajuudet nolasta alem-
paan rajataajuuteen f_L asti ja kaikki ylempää rajataajuutta f_H suuremmat taajuudet. Raja-
taajuuksien väliin jäävät taajuudet suodatetaan. Ensimmäisen rajataajuuden f_L jälkeen
vahvistus laskee tasaisesti 20 dB dekadilla. Systeemillä on kaksi nollaa yhtälön (7) osoit-
tajapolynomin kaksinkertaisen juuren osoittamalla taajuudella f_C . Tällä taajuudella alkaa
vahvistus kasvaa tasaisesti 20 dB dekadilla. Jälkimmäisellä rajataajuudella f_H systeemin



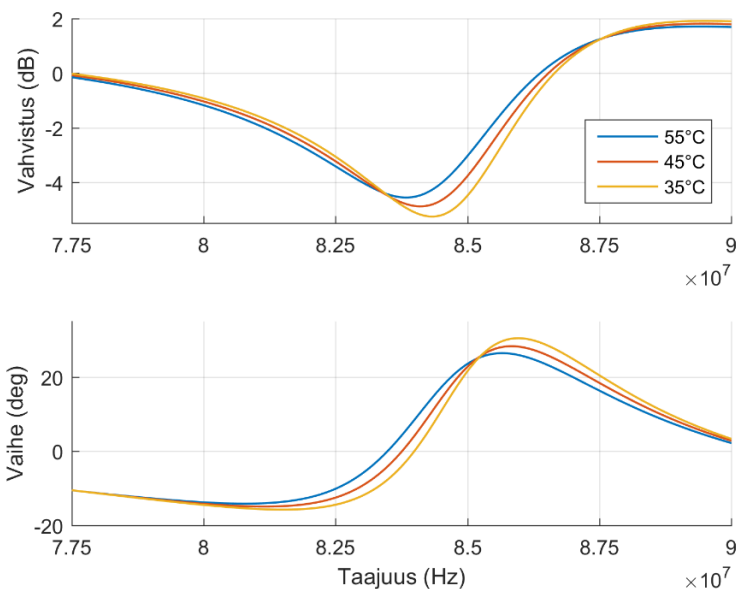
Kuva 2-4: Kaistanestosuotimen teoreettinen taajuusvaste. Muokattu lähteestä [22]

vahvistuksenmuutos tasaantuu systeemin toisen navan vuoksi. Suodatettava kaistanleveys voidaan laskea ylemmän ja alemman rajataajuuden erotuksena.

3. LÄMPÖTILANKOMPENSOINNISSA KÄYTETYT METODIT JA MATERIAALIT

Tässä työssä kokeiden suorittamiseen on käytetty TTY:n TUTL (Tutkimuksesta uutta tietoa ja liiketoimintaa) tyyppisessä Tekes-projektissa tutkittua ja kehitettyä Collo [15] mittalaitetta. Collo on kolloidisten suspensioiden analysointiin kehitetty prosessiin integroitava online-mittalaite, joka tarkastelee kolloidien pinta-varauksia. [20] Collolla pystytään mittaamaan mm. suspensioiden homogeenisuutta, dispergointiaineiden kiinnittymistä kolloidien pintaan sekä suspension sähköisen tilan muutoksia. Tässä työssä tutkitaan Collo-mittalaitteen vasteen riippuvuutta mitattavan suspension lämpötilasta.

Mittalaite mittaa taajuusvasteen nesteestä halutulta taajuusalueelta. Mittaus perustuu sähköiseen resonaattoriin ja neste toimii mittauksessa väliaineena, joten mittausvaste riippuu sen sähköisistä ominaisuuksista. Tiedetään, että lämpötila vaikuttaa aineen permittiivisyyteen. [8] [9] Väliaineen permittiivisyys vaikuttaa mittalaitteen resonaattoriin kapasitanssiin ja sen myötä saatavaan mittausvasteeseen. Kokeissa käytimme lämpötilakompensaatioon paria esimerkkiä, kuten kahvia ja öljyä. Valitut nesteet eivät täytä kolloidisen suspension määritelmiä, kuitenkin lämpötilan vaikutus niihin on samankaltainen kuin suspensioihin. Koeaineiksi valittiin nämä niiden helpon saatavuuden ja käsiteltävyyden vuoksi. Kuvassa 3-1 on kolme taajuusvastetta Pauligin Juhla Mokka vaaleapaahtoisesta kahvista 55°C, 45°C ja 35°C lämpötiloissa.



Kuva 3-1: Collo-mittalaitteen taajuusvaste Paulig Juhla Mokka vaaleapaahtokahvista eri lämpötiloissa.

Kuvan taajuusvasteista havaitaan, että lämpötilan muuttuessa vahvistuksen kuvaajien piikkien miniarvojen taajuudet ja piikkien leveydet muuttuvat, eli toisin sanoen piirteiden BWG ja FG -arvot muuttuvat lämpötilan funktiona. Tässä työssä pyritään rakentamaan matemaattinen malli, jolla lämpötilan vaikutus voidaan kompensoida saadusta vasteesta. Aluksi mitatut taajuusvasteet mallinnetaan. Sen jälkeen muodostetaan lämpötilariippuvainen malli, jonka avulla voidaan lämpötilan vaikutusta mittausvasteeseen arvioida ja laskennallisesti poistaa sen vaikutus vasteesta. Tavoitteena on muodostaa uusi taajuusvasteen kuvaaja, joka on identtinen alkuperäisen tavoitelämpötilassa olevan kanssa.

3.1 Mallinnus

Eri lämpötiloissa mitatuista vasteista voidaan muodostaa malli, joka kuvaa mitatun nesteen vastetta lämpötilan funktiona. Nesteen lämpötilariippuvaisten sähköisten ominaisuuksien karakterisointiin esitellään tässä työssä kolme menetelmää. Kaikissa kolmessa menetelmässä mitatuista vasteista lasketaan tunnuslukuja ja eri lämpötiloissa mitattujen vasteiden tunnuslukujen välille muodostetaan sovite.

Kaksi ensimmäistä menetelmää perustuvat siirtofunktioihin. Mittalaitteen vasteena saadaan kompleksilukupisteet mitatulta taajuusalueelta, eli taajuusvaste. Koska mitattu data on taajuustasossa, on sen mallintaminen luonnollista suorittaa siirtofunktioiden avulla. Tällöin dataa voidaan käyttää laskennassa sellaisenaan, eikä sitä tarvitse muokata mitenkään. Toinen tapa käsitellä mittausdataa on käsitellä kompleksilukupisteistä piirrettyä bode-kuvaajaa kuin mitä tahansa polynomifunktiosta piirrettyä kuvaajaa. Kolmas esitelty menetelmä on Gaussin käyrään perustuva RBFN, jota käytetään taajuusvasteen vahvistuksen kuvaajan mallintamiseen.

3.1.1 Lämpötilariippuvuuden mallintaminen siirtofunktioilla

Mittalaitteen vaste riippuu voimakkaasti mitattavan nesteen lämpötilasta. Riippuvuus ei ole tarkkaan tiedossa, joten sitä ei voida suoraan mallintaa lineaarisena tai epälineaarisenä systeiminä. Kuitenkin tietyssä lämpötilassa vastetta voidaan approksimoida yhdellä lineaarisella aikainvariantilla systeemillä.

Systeemejä kuvataan siirtofunktioilla, jotka muodostetaan mitatusta taajuusvasteesta. Systeemin siirtofunktio voidaan määrittää tietyssä lämpötilassa käänteismallintamalla kyseisen lämpötilan taajuusvaste. Yksi tapa taajuusvasteen käänteismallinnukseen on Matlabin *invfreqs*-komento [23], joka muodostaa jatkuva-aikaisen siirtofunktion sille annetusta kompleksisesta taajuusvasteesta. Siirtofunktio on yhtälön (1) mukainen. Komentolle voidaan määritellä siirtofunktion asteluku, eli napojen ja nollien määrät.

Vasteista muodostetuista siirtofunktioista erotellaan kaikki kertoimet $\{b_i\}_{i=0}^m$ ja $\{a_i\}_{i=0}^n$. Kaikki yksittäiset kertoimet b_i ja a_i eri lämpötiloista muodostavat joukon. Muodosta-

mallalla polynomisovitteet näille joukoille erikseen saadaan sovitekäyrät lämpötilan funktiona. Polynomisovitteet voidaan muodostaa käyttäen Matlabin *fit*-funktia [23]. Sovitekäyrltä voidaan interpoloida kunkin kertoimen arvo halutussa lämpötilassa ja muodostetaan niistä siten uusi yhtälön (1) mukainen systeemin siirtofunktio. [13]

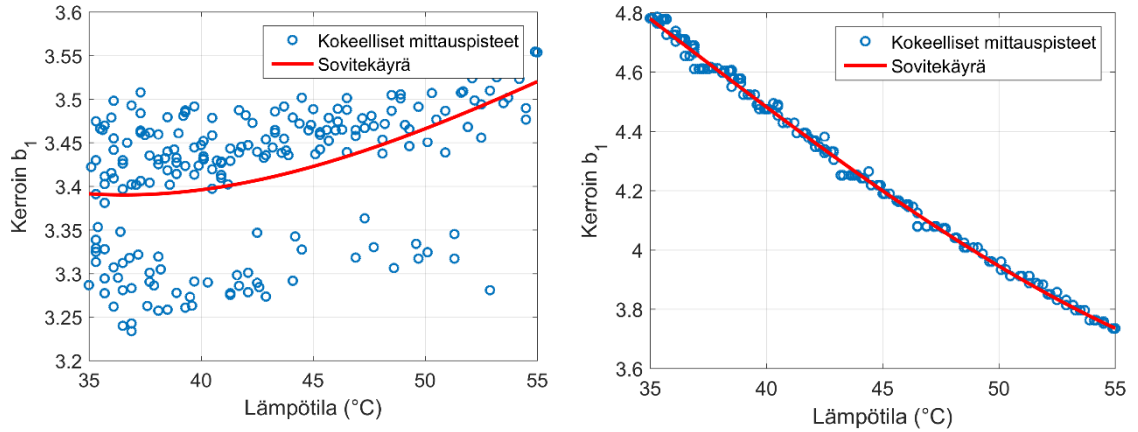
3.1.2 Siirtofunktion kaksinkertainen mallinnus

Edellisessä kappaleessa esitetyllä metodilla saadaan laskettua tarkka sovite yhdelle taajuusvasteelle. Lämpötilan muuttuessa myös kertoimien arvot muuttuvat. Jos siirtofunktion kertoimia lähdetään etsimään joka kerta niin sanotusti nollasta, voidaan mallinnuksessa joskus päätyä jo kahden peräkkäisen taajuusvasteen kohdalla hyvin erilaiseen lopputulokseen siirtofunktion kertoimien osalta. Etenkin jos napojen tai nollien määrät ovat suuria voi kertoimiin lämpötilan funktiona syntyä epäjatkuvuuskohtia. Tämä ilmiö on havaittavissa Kuvassa 3-2 on vasemmalla auringonkukkaöljyn, joka on yksi kokeissa käytetyistä nesteistä, taajuusvasteen kertoimen b_1 arvot. Taajuusvasteet ovat mallinnettu käyttäen viittä napaa ja viittä nollaa. Kuvaajasta havaitaan, että kertoimen arvot vaihtuvat myös peräkkäisten pisteiden välillä paljon.

Epäjatkuvuuskohtien esiintyminen johtuu siitä, että muodostetussa siirtofunktiossa on liikaa parametreja. Kun parametreja on liikaa laskettu sovite ei ole uniikki, eli yhtä hyvään lopputulokseen päästään useammalla eri napojen ja nollien kombinaatiolla. Epäjatkuvuuskohtia voidaan välttää ja mallinnetun vasteen tarkkuutta voidaan parantaa käyttämällä sen laskennassa navoille ja nolille alkuarvoja, joiden läheisyydestä halutaan soviteen löytyvän. Alkuarvojen käyttö ei poista uniikkisuus ongelmaa. Kuitenkin sen avulla löydetään aina ne sovitteet, jotka ovat parametreiltaan lähellä toisiaan.

Matlabin *tfest*-komennolla [23] voidaan arvioida systeemin siirtofunktiota taajuusvasteesta samaan tapaan kuin *invfreqs*-komennolla, mutta *tfest*-funktiolle voidaan antaa lisäoptiona myös alkuarvot. Asettamalla *invfreqs*-mallinnuksella saatu siirtofunktio tai aina edellisen taajuusvasteen siirtofunktio alkuarvoksi voidaan epäjatkuvuuskohtien esiintymistä välttää ja siten mallista laskettavan siirtofunktion tarkkuutta parantaa. Kuvassa 3-2 oikealla on nähtävissä auringonkukkaöljyn taajuusvasteista mallinnetut b_1 kertoimen arvot, kun laskennassa on käytetty alkuarvoja. Myös tässä mallinnuksessa on käytetty viittä napaa ja viittä nollaa. Alkuarvon kanssa kertoimen arvot asettuvat lähes peräkkäin käyrälle. Sen lisäksi soviteen suunta ja vaihteluväli ovat muuttuneet selvästi.

Mallinnus voidaan suorittaa myös pelkästään *tfest*-funktia käyttämällä, antamalla sille haluttu napojen ja nollien lukumäärä. Muodostetuista siirtofunktiosta muodostetaan polynomisovitteet samalla metodilla kuin *invfreqs*-funktion yhteydessä tehtiin. Käytettäessä *tfest*-funktia on huomattava, että se ei toimi toivotulla tavalla, jos sille syötetyt taajuusarvot ovat erittäin suuria. Taajuudet tulee skaalata pienemmiksi mallinnuksen onnistumiseksi. Tämän ongelman tarkka syy ei ole tiedossa, mutta oletettavasti se liittyy soviteen laskennassa syntyvän virheen ja virherajojen skaalautumiseen keskenään. Tässä



Kuva 3-2: Auringonkukkaöljyn taajuusvasteille $tfest$ -komennolla lasketun viiden nollan ja viiden nollan siirtofunktion b_1 kertoimen arvot ja sovite vasemmalla ilman alkuarvoja ja käyttäen edellisen taajuusvasteen arvoja alkuarvona oikealla.

työssä $tfest$ -funktioille annettava taajuusvektori on aina jaettu sen suurimman taajuuden puolikkaalla. Mallinnuksen jälkeen taajuusvektori tulee skaalata takaisin, jotta laskettavien piirteiden lukuarvot ovat vertailukelpoisia skaalaamattomien taajuusteiden piirteiden kanssa.

3.1.3 Gaussin käyrään perustuva RBFN

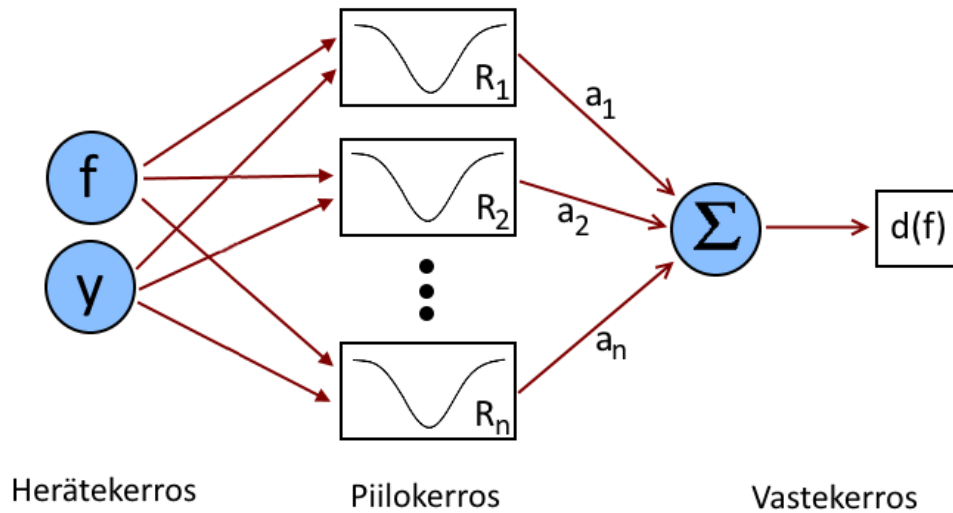
Siirtofunktiosovitteen sijasta myös RBFN-sovitteiden käyttäminen on mahdollista mallinnettaessa mitattuja taajuusvasteita. RBFN on eräänlainen neuroverkko, joka koostuu Kuvan 3-3 mukaisesti kolmesta kerroksesta. Herätekerroksesta syötetään mitatun taajuusvasteen vahvistuksen ja taajuuden arvot vektoreissa piilokerroksen jokaiselle tasolle. Piilokerros koostuu n määrästä kantafunktioita R_i . Mittalaitteen tuottama taajuusvasteen vahvistuksen kuvaaja muistuttaa käänteistä Gaussin, eli normaalijakauman, käyrää. Sen vuoksi on luonnollista käyttää kantafunktiona Gaussin yhtälöä, joka on

$$R_i(f) = e^{-\left(\frac{f-b_i}{c_i}\right)^2}, \quad (8)$$

missä e on Neperin luku, b ja c ovat polynomiyhtälön muuttujia ja f on taajuus.

RBFN:n vastefunktio $d(f)$ muodostetaan kertomalla kantafunktioiden vasteita painoker-toimilla a_i ja summaamalla painotetut vasteet yhteen:

$$d(f) = \sum_{i=1}^n a_i R_i(f). \quad (9)$$



Kuva 3-3: RBFN:n rakenne

Käytettäessä RBFN-sovitetta taajuusvasteen mallinnuksessa halutaan, että mallinnettava taajuusvaste ja muodostettu vastefunktio d ovat mahdollisimman lähellä toisiaan. Mallinnuksessa etsitään kantafunktioiden muuttujille a_i , b_i ja c_i sellaiset arvot, että kantafunktioiden painotetut vasteet summattuna ne muodostavat mahdollisimman lähellä mallinnettavaa taajuusvastetta olevan vasteen. Gaussin käyrään perustuva RBFN voidaan muodostaa Matlabin *fit*-funktioilla. [23] Funktiolle määritellään mallinnettavan herätteen arvopisteet ja käytettävä kantafunktioiden määrä eli asteluku n .

Kuten edellisissä, myös tässä metodissa jokaiselle kertoimelle $\{a_i\}_{i=1}^n$, $\{b_i\}_{i=1}^n$ ja $\{c_i\}_{i=1}^n$ muodostetaan erikseen polynomisovite lämpötilan funktiona. Muodostetuilta sovitteilta interpoloidaan kertoimien arvot halutussa lämpötilassa ja muodostetaan uusi kuvaaja. Myös tällä metodille voidaan määrittää alkuarvoja mallinnukselle. Alkuarvoina voidaan käyttää esimerkiksi edellisen taajuusvasteen sovitteen kertoimia, jolloin voidaan vähentää epäjatkuvuuskohtien syntymistä.

3.2 Lämpötilan kompensointi

Tämän luvun edellisissä kappaleissa muodostettiin malli, joka kuvaa mallidatan pohjalta lämpötilan aiheuttamaa muutosta mittausvasteeseen. Muodostetun mallin avulla voidaan mitattava vaste siirtää haluttuun lämpötilaan, jos taajuusvasteen alkuperäinen lämpötila tunnetaan.

Jotta lämpötilan kompensointi voidaan suorittaa, täytyy kompensoitava taajuusvaste myös mallintaa. Jos mallin muodostuksessa on käytetty siirtofunktiota, täytyy myös kompensoitava taajuusvaste mallintaa siirtofunktioksi. Jos malli on tehty RBFN:n pohjalta, täytyy vaste mallintaa taas saman asteiseksi kantafunktiosovitteeksi. Kompensoitavan

taajuusvasteen mallintamisen lisäksi myös mallista muodostetaan kaksi taajuusvastetta. Yksi samassa lämpötilassa kuin kompensoitava taajuusvaste ja toinen tavoitteessa lasketuna.

Yksi tapa tehdä lämpötilakompensaatio, silloin kun halutaan konvertoida lämpötilassa A tehty vastemittaus G_m vastaamaan lämpötilassa B mitattua taajuusvastetta, on käyttää mallista muodostettujen lämpötilojen A ja B vastaavien kompensointitaajuusvasteiden suhdetta, jolla kertomalla vastemittauksista G_m saadaan lämpötilaa B vastaava kompleksinen taajuusvaste (jatkossa vain taajuusvaste) G_c

$$G_c(j\omega) = \frac{H_{T_B}(j\omega)}{H_{T_A}(j\omega)} * G_m(j\omega), \quad (10)$$

missä H_{T_B} on halutun lämpötilan taajuusvaste mallidatasta ja H_{T_A} vastemittauksen lämpötilassa oleva taajuusvaste mallidatasta. Tällä menetelmällä kompensoitaessa ei taajuusvasteita kuvaavien siirtofunktioiden tarvitse välttämättä olla samaa astelukua.

Toinen tapa laskea kompensoitu taajuusvaste soveltuu sekä siirtofunktiomenetelmille että RBFN:lle. Menetelmä on muuten sama kuin edellä esitetty, paitsi nyt käytetään laskennassa yksittäisiä kertoimia kokonaisten siirtofunktioiden sijaan. Laskemalla mallista jokaiselle RBFN:n kertoimelle tai siirtofunktion navalle ja nolalle erikseen suhteellinen muutos tavoitelämpötilan ja kompensoitavan taajuusvasteen lämpötilan välillä ja kertomalla sillä samaan tapaan kompensoitavan taajuusvasteen vastaavaa kerrointa voidaan muodostaa uusi kompensoitu taajuusvaste. Tällä menetelmällä siirtofunktioiden tai RBFN-sovitteiden tulee aina olla samaa astelukua mallissa ja mallinnetussa vasteessa, että kertoimien määrät täsmäävät.

3.3 Suora muutoskompensointi

Yksinkertaisin tapa lämpötilakompensoinnille todennäköisesti olisi laskea vain mallista kuinka suuri muutos piirteessä on kahden lämpötilan välillä ja vähentämällä se taajuusvasteesta lasketusta arvosta. Tämä metodi ei ota huomioon, kuinka taajuusvasteen kuvaajan muodot muuttuvat lämpötilojen välillä, vaan ainoastaan kuinka piirteiden BWG ja FG-arvot muuttuvat. Tätä yksinkertaista menetelmää käytetään tässä työssä vertailun lähtökohtana monimutkaisempien menetelmien kanssa.

4. KOEJÄRJESTELYT JA KOETULOSTEN MAL- LINNUS

Tässä työssä suoritettiin kokeita Paulig Juhla Mokka kahvilla ja auringonkukkaöljyllä. Kahvilla kokeita suoritettiin vaalea ja tummapaahdokahvilla. Niin sanottua normaalipaah-
toista kahvia nimitetään tässä työssä vaaleapaahdokseksi sekaannuksien välttämiseksi. Nesteiksi valittiin nämä, koska vaalea ja tummapaahdokahvit ovat ominaisuuksiltaan hy-
vin lähellä toisiaan, kun taas auringonkukkaöljy on selkeästi erilainen. Kokeiden avulla
haluttiin selvittää, kuinka yhtenevästi kaksi lähes samanlaista nestettä käyttäytyvät läm-
pötilan muuttuessa ja vastaavasti, kuinka vaste muuttuu, kun kyseessä on hyvin erilainen
aine. Työssä haluttiin myös selvittää miten eri metodien mukaiset mallit toimivat, kun
kyseessä on samankaltaiset tai hyvin erilaiset nesteet. Lisäksi kokeilla haluttiin selvittää,
pystytäänkö mittalaitteella erottelemaan vaalea- ja tummapaahdokahvi toisistaan.

Tässä luvussa käsitellään aluksi suoritettujen mittauksien mittausjärjestelyt ja käydään
läpi raakadatan käsittely. Toisessa kappaleessa tutkitaan vasteen muuttumista lämpötilan
funktiona ja kolmannessa vertaillaan eri nesteiden vasteita ja niistä laskettuja piirteitä.
Neljännessä kappaleessa muodostetaan malleja mitatusta datasta ja kompensoidaan läm-
pötilan vaikutusta käyttäen luvussa kolme esiteltyjä eri metodeja. Metodeja testataan kol-
messa kompensointikokeessa, joissa vaaleapaahdokahvin taajuusvasteita kompensoi-
daan vaaleapaahdokahvista, tummapaahdokahvista ja auringonkukkaöljystä muodostetuilla
malleilla. Taajuusvasteen vahvistus ja vaihe molemmat muuttuvat lämpötilan mukana.
Kuitenkin tässä luvussa käsitellään taajuusvasteita ainoastaan vahvistuksen osalta, koska
kaikki tässä työssä esitetyt piirteet lasketaan siitä. Käsiteltäväksi lämpötila-alueeksi on
valittu 35°C -55°C.

4.1 Koemittaukset

Mittaukset suoritettiin käyttämällä kolloidisten suspensioiden analysointiin kehitettyä
Collo [15] mittalaitetta. Mitattavia nesteitä oli kolme erilaista: vaaleapaahdokahvi, tum-
mapaahdokahvi ja auringonkukkaöljy. Kokeissa kahvia keitettiin samalla kahvinkeit-
timellä neljä kuppia. Kahvinpuruja annosteltiin neljä mittalusikallista ja valkaisu-
suodatinpussin reunat taiteltiin joka kerta samalla tavalla. Keitetystä kahvista mitattiin
kaksi desilitraa kahvia pestyyn ja kuivattuun mitta-astiaan. Auringonkukkaöljyä mitattiin
niin ikään kaksi desilitraa ja se lämmitettiin kattilassa liedellä, jonka jälkeen kaadettiin
mitta-astiaan. Mitta-astia suljettiin kannella nesteen haihtumisen estämiseksi.



Kuva 4-1: Mittausjärjestelyt. 1: mitta-astia, 2: Collo-anturi, 3: lämpötilamittaus, 4: Collo-mittalaite

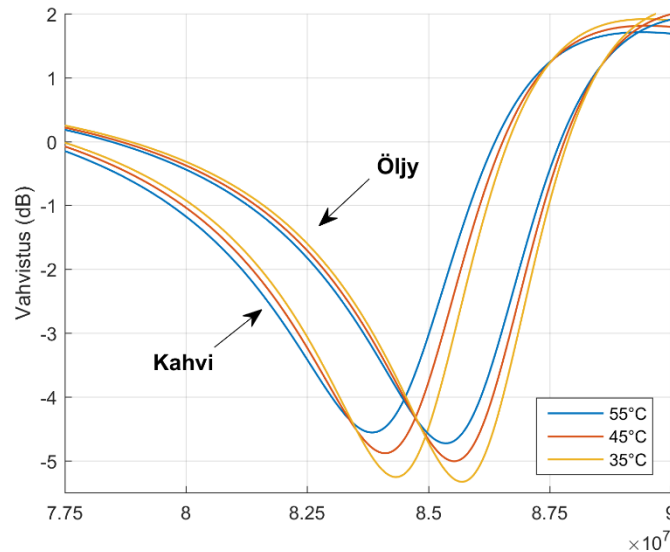
Mitta-astia asetettiin Collo-anturin päälle mittausalustalle ja lämpötila-anturi vietiin purkin pohjalle kannessa olevan reiän läpi. Lämpötilamittaus ja Collo-anturi kytkettiin mittalaitteeseen, joka kytkettiin tietokoneeseen. Kuva 4-1 esittää mittausjärjestelyt ja sen eri osat.

Nesteiden annettiin jäähtyä huoneen lämmössä (noin 23°C) ja siitä mitattiin lämpötila ja taajuusvaste 65-95 MHz alueelta käyttäen 2000 pistettä. Mittaukset suoritettiin 10 sekunnin viiveellä mittausten välissä. Taajuusvaste mitattiin viiden sekunnin jatkuvana mittauksena, mikä keskiarvotettiin. Mittauksen keston, asetetun viiveen ja muiden viiveiden (mm. mittauksen tallennus) yhteisvaikutuksen johdosta mittausten todellinen väli oli noin 17 sekuntia.

Jokaisesta viisi sekuntia kestävästä mittauksesta keskiarvotettiin yksi taajuusvaste. Tästä taajuusvasteesta poistettiin vielä trendi, eli taajuusvasteiden alku ja loppupää asetettiin samalle tasolle. Tällä menettelyllä pyritään selkeyttämään vasteeseen tulevaa piikkiä. Joissakin esitetyissä kuvissa vasteiden alku ja loppupäät eivät näytä olevan samalla tasolla. Tämä johtuu siitä, että kuvan selkeyttämiseksi koko 65-95 MHz aluetta ei ole esitetty. Mitatun vasteen vahvistuskäyrältä laskettiin BWG ja FG piirteet luvussa 2.2.3 esitetyllä tavalla.

4.2 Taajuusvaste lämpötilan funktiona

Mittalaitteen tuottama vaste muuttuu lämpötilan muuttuessa, koska nesteen sähköiset ominaisuudet muuttuvat lämpötilan mukana. [8] [9] Kokeissa lämpötilan laskemisen aiheuttama muutos vasteessa on dominoiva ominaisuus. Mahdollisten muiden muutosten kahvissa tai auringonkukkaöljyssä oletetaan olevan häviävän pieniä verrattuna lämpötilan

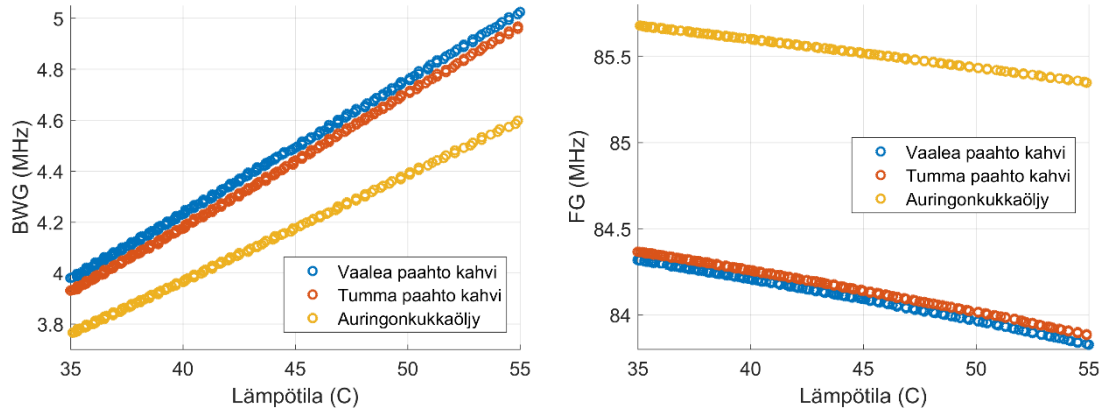


Kuva 4-2: Vaaleapaahtoisen kahvin ja auringonkukkaöljyn taajuusvasteen vahvistus kymmenen asteen välein.

aiheuttamaan muutoksiin. Kuvassa 4-2 on taajuusvasteen vahvistuksen kuvaajat kymmenen asteen välein vaaleapaahtoisesta kahvista ja auringonkukkaöljystä. Vaalea- ja tummapaahtoisen kahvin kuvaajien erot ovat niin pieniä, että taajuusvastekuvaajasta niiden erojen havaitseminen olisi hankalaa. Tämä johtuu siitä, että vaalea ja tummapaahto ovat aineina hyvin samankaltaisia. Valmistusprosessissa vaalean ja tumman erottaa vain se, että tummaa on paahdettu pidemmän aikaa, jonka seurauksena lopputulos on hieman erilainen. [24]

Kuvaajista havaitaan, että sekä kahvilla että öljyllä lämpötilan laskiessa taajuusvasteen vahvistuksen käyrän minimi siirtyy alaoikealle. Muutokset käyrissä ovat samankaltaisia molemmilla nesteillä, mutta kahvissa muutokset ovat voimakkaampia. Kahvin ja öljyn välillä on selkeä ero vasteen resonanssiipiikin paikassa taajuusakselilla. Öljystä mitatun vasteen piikit ovat selkeästi suuremmilla taajuuksilla, kuin mitä kahvista mitatut vasteet samoissa lämpötiloissa. Molemmilla nesteillä resonanssitaajuus, eli FG-arvo, kasvaa ja myös piikin vahvistuksen minimiarvo myös pienenee lämpötilan laskiessa. Piirteen BWG arvot pienenevät, eli piikit kapenevat lämpötilan laskiessa. On huomattava, että BWG:n laskentakohta siirtyy lämpötilan mukana, koska se lasketaan aina kolme desibeliä minimikohtaa suuremmalta vahvistuksen arvosta jokaiselle vasteelle erikseen.

Kuva 4-3 sisältää BWG ja FG-arvot lämpötilan funktiona vaalea- ja tummapaahtoista kahvista sekä auringonkukkaöljystä. Kaikki piirteiden arvot asettuvat samalle suoralle ja ovat lähes lineaarisia lämpötilan muutoksen suhteen. BWG ja FG-arvot vaalea ja tummapaahdon välillä ovat hyvin lähellä toisiaan ja etenevät samalla kulmakertoimella lämpötilan funktiona. Auringonkukkaöljyn BWG ja FG-arvot sen sijaan ovat selkeästi erillään kahvin vastaavista. BWG-arvot öljyssä ovat pienempiä kuin kahvin vastaan lämpötilan arvot ja lisäksi öljyn BWG-arvojen muutos on loivempaa lämpötilan kasvaessa. Myös



Kuva 4-3: Paulig Juhla Mokka vaalea ja tummapaahdon sekä auringonkukkaöljyn BWG vasemmalla ja FG oikealla lämpötilan funktiona.

FG-arvojen pieneneminen lämpötilan kasvaessa on loivempaa öljyssä kuin mitä se on kahvissa.

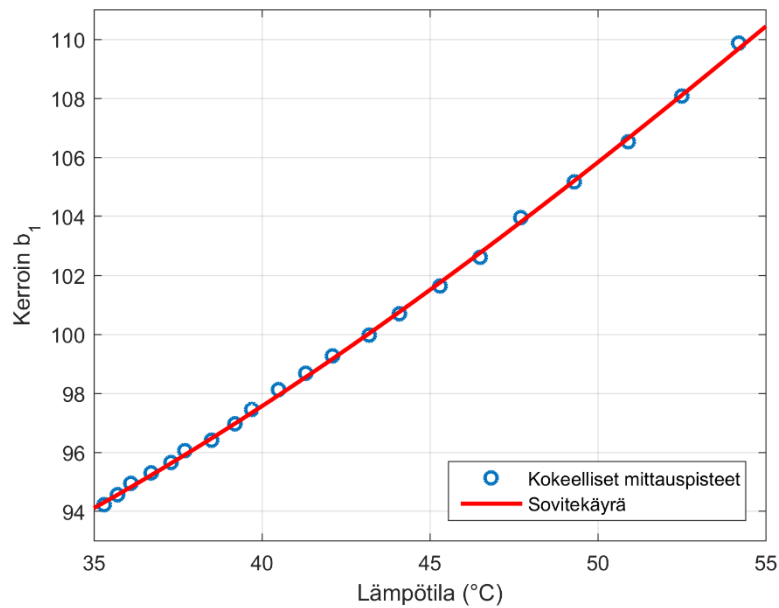
4.3 Mallinnus

Luvussa 3.1 esiteltiin metodeja mitatun taajuusvasteen mallintamiseksi. Tässä luvussa mallinnetaan tumma ja vaaleapaahdokahvin sekä auringonkukkaöljyn taajuusvasteita eri menetelmillä. Aluksi käsitellään siirtofunktiomalleihin perustuvat ja sen jälkeen RBFN-sovitteisiin perustuvat mallinnusmenetelmät. Kaikissa mallinuksissa on käytetty painotusvektoria. Mitatulla taajuusvälillä on 2000 pistettä kokonaisuudessaan. Taajuusvasteen vahvistuksen minimikohdasta, eli piirteen FG laskentakohdalta, ± 20 pistettä painotettiin kertoimella 20. Piirteen BWG laskentakohdista painotettiin ± 30 pistettä myös painokerrotoimella 20. BWG ja FG laskentakohtien väliin jäävälle alueelle on annettu painokerroin kolme. Loppuja pisteitä ei otettu mallinnuksessa huomioon. Painotuksella varmistetaan, että mallinnus on erityisen tarkka tärkeiltä, eli piirteiden laskennan, kohdilta. Koko mitausalueen tarkka mallintaminen olisi kasvattanut sovitteiden astelukuja kohtuuttomasti.

Kaikkien mitattujen nesteiden vasteet mallinnettiin, mutta tässä luvussa käsitellään esimerkkinä vaaleapaahdokahvin taajuusvasteiden mallintamista yhden navan ja kahden nollan systeemeistä aina neljän navan ja nollan systeemeihin. Loput mallinnetuista systeemeistä tarkastellaan tarkemmin vasta luvussa 5 Mittaustuloksien tarkastelu.

4.3.1 Siirtofunktiomallinnus invfreqs-komennolla

Siirtofunktion napojen ja nollien määrä vaikuttaa merkittävästi mallinnuksen tarkkuuteen. Yksinkertaistetusti napa vähentää ja nolla lisää taajuusvasteen vahvistusta 20 desibeliä dekadilla sen luonnollisen kulmataajuuden jälkeen. [16] Mitä enemmän napoja ja nollia on, sitä tarkemmin vahvistuksen kuvaajaa voidaan kääntää haluttuun suuntaan halutulta kohdalta.



Kuva 4-4: Kaikista taajuusvasteista laskettu sovite kertoimelle b_2 ja joka kymmenes kertoimen arvo lämpötilan funktiona.

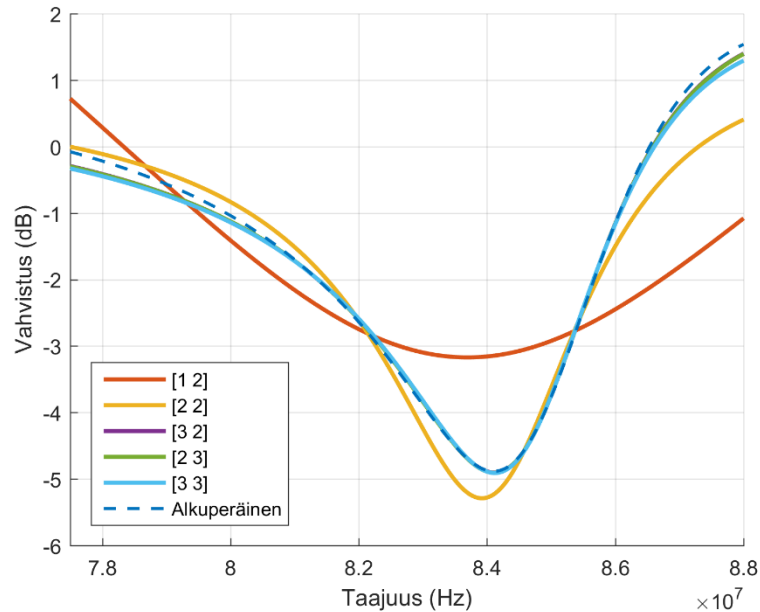
Luvussa kolme esitetyn metodin mukaisesti kaikkien taajuusvasteiden siirtofunktioiden kertoimille muodostetaan polynomisovite lämpötilan funktiona. Kuvassa 4-4 on ketoilmen b_2 joka kymmenes taajuusvasteista mallinnettu kertoimen arvon ja kaikille taajuusvastesovitteille laskettu sovitekäyrä vaaleapaahtoisen kahvin taajuusvasteista lämpötilan funktiona. Mittausvasteet on mallinnettu käyttäen kolmea napaa ja kahta nollaa, eli toisin sanoen siirtofunktiossa on kolme b kerrointa ja neljä a kerrointa.

Polynomisovitteeksi lämpötilojen välille on tässä tapauksessa valittu kolmannen asteen polynomi, joka siten tälle esimerkkimittaussarjalle lämpötilan T funktiona, on

$$b_0(T) = -13,72 * 10^{-5} * T^3 + 26,22 * 10^{-3} * T^2 - 0.696 * T + 92.23. \quad (11)$$

Poimimalla jokaisen kertoimen omalta sovitekäyrältä kertoimen arvo halutussa lämpötilassa voidaan muodostaa taajuusvaste kyseisessä lämpötilassa. Kuvassa 4-5 on vaaleapaahtoisen kahvin alkuperäisen 45°C:n taajuusvasteen ja eri napojen ja nollien määrillä mallinnetut vasteet. Kuvaan ei ole piirretty kahden navan ja yhden nollan systeemiä, koska edellä esitetyn teorian mukaisesti ei sellaisella systeemillä pystytty kuvaamaan piikkiä alaspäin. Kuvasta havaitaan, että yhden navan ja kahden nollan sekä kahden navan ja nollan systeemit eivät pysty kuvaamaan taajuusvastetta kovin hyvin. Näitä korkeamman asteen systeemit taas menevät lähes päällekkäin alkuperäisen vahvistuksen kuvaajan kanssa.

Yhtälön (1) mukaiset vaaleapaahtoisen kahvin 35, 45 ja 55°C:en taajuusvasteille *invfreqs*-komennolla mallinnetut siirtofunktioiden kertoimet ovat esitetty taulukossa 1. Systeemi



Kuva 4-5: Vaaleapaahtokahvin 45°C:n alkuperäinen taajuusvaste ja eri määrillä napoja ja nollia invfreqs-komennolla mallinnetut taajuusvasteet. Hakasulkeissa oleva ensimmäinen luku on napojen ja toinen nollien lukumäärä.

on mallinnettu käyttäen kolmea napaa ja kahta nollaa, koska eri kombinaatioiden kokeilun jälkeen nämä olivat pienimmät lukumäärät, joilla vasteen mallinnus onnistui silmämääräisesti hyvin.

Kaikkien kertoimien arvot kasvavat lämpötilan mukana tasaisesti. Näin tapahtuu myös esitettyjen taajuusvasteiden välissä, eli toisin sanoen epäjatkuvuus kohtia ei syntynyt, vaikka tällä menetelmällä ei alkuarvoja käytettykään.

Taulukko 1: Vaaleapaahtoisen kahvin siirtofunktioiden kertoimet 35, 45 ja 55 °C taajuusvasteista käyttäen invfreqs-komentoa kolmen navan ja kahden nollan systeemistä.

Kerroin	$G_{35}(s)$	$G_{45}(s)$	$G_{55}(s)$
b_0	$1,180 * 10^4$	$1,267 * 10^4$	$1,371 * 10^4$
b_1	34,36	39,94	46,24
b_2	94,1	101,5	110,4
a_0	$1,035 * 10^4$	$1,118 * 10^4$	$1,216 * 10^4$
a_1	185,3	191,7	199,1
a_2	81,14	88,12	96,47
a_3	1	1	1

4.3.2 Siirtofunktiomallinnus tfest-komennolla

Tässä kokeessa vaaleapaahtoisen kahvin taajuusvasteista mallinnettiin tfest-komennolla käyttäen edellistä taajuusvastetta alkuarvona. Ensimmäisen mittauspisteen taajuusvasteen

mallinnuksessa ei alkuarvoja ole käytetty. Mallinnuksessa käytettiin systeimejä aina yhden navan ja kahden nollan systeimeistä aina neljän navan ja nollan systeimeihin.

Yhtälön (1) mukaiset vaaleapaahtoisen kahvin mittausarjan 35, 45 ja 55°C taajuusvas-teille *tfest*-komennolla mallinnetut siirtofunktioiden kertoimet ovat esitetty taulukossa 2. Systeemi on mallinnettu käyttäen kolmea napaa ja kahta nollaa.

Taulukko 2: Vaaleapaahtoisen kahvin siirtofunktioiden kertoimet 35, 45 ja 55°C taajuusvasteista käyttäen *tfest*-komentoa.

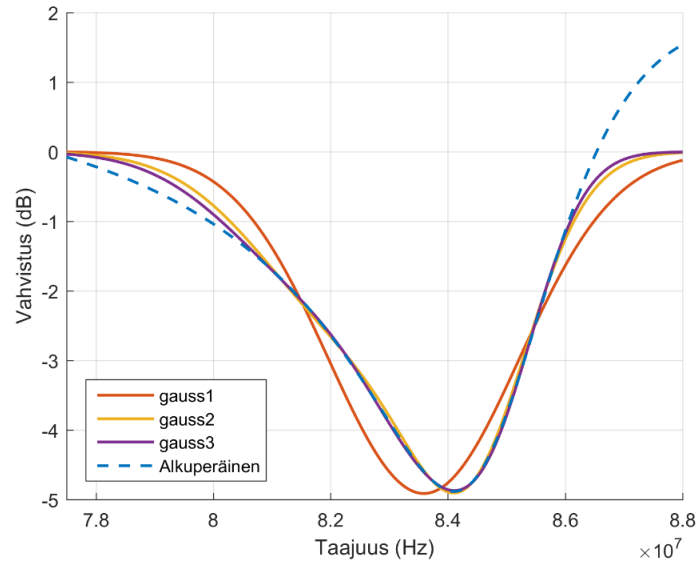
Kerroin	$G_{35}(s)$	$G_{45}(s)$	$G_{55}(s)$
b_0	$1,169 * 10^4$	$1,253 * 10^4$	$1,354 * 10^4$
b_1	34,1	39,55	45,75
b_2	93,23	100,3	109,1
a_0	$1,025 * 10^4$	$1,105 * 10^4$	$1,201 * 10^4$
a_1	184,7	191,0	198,2
a_2	80,36	87,08	95,24
a_3	1	1	1

Kuten edellisellä metodilla myös tällä menetelmällä kaikkien kertoimien arvot kasvavat lämpötilan mukana. Näin tapahtuu myös esitettyjen taajuusvasteiden välillä. Alkuarvojen käytöllä ei ollut merkitystä kertoimien lukuarvoihin valituilla napojen ja nollien määrillä. Kertoimien arvot kuitenkin eroavat hieman *invfreqs*-komennolla mallinnetusta. Erot ovat kuitenkin hyvin pieniä.

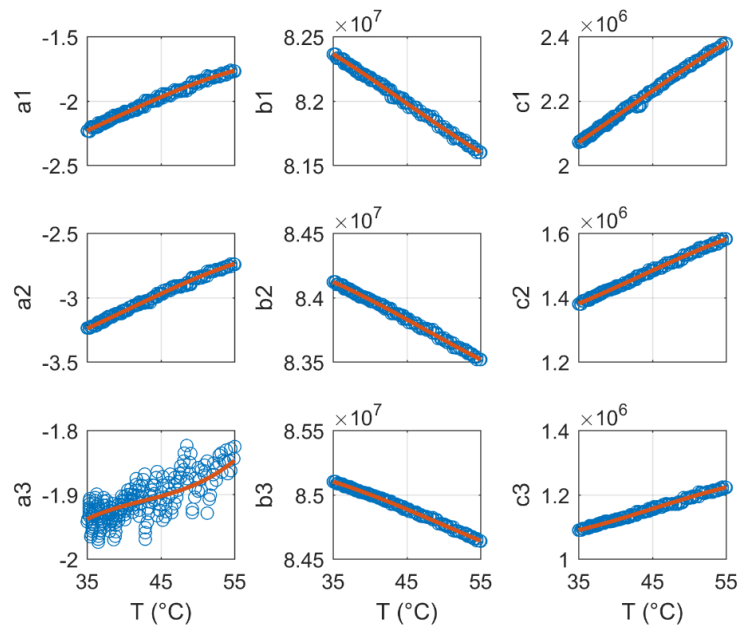
4.3.3 RBFN-mallinnus

Siirtofunktioiden lisäksi voidaan taajuusvaste mallintaa myös ajattelemalla sitä, kuin mitä tahansa käyrää. Taajuusvasteen vahvistuksen kuvaaja muistuttaa muodoltaan negatiivista normaalijakauman eli Gaussin käyrän muotoa. Tässä kokeessa mallinnettiin vaaleapaahtokahvista mitattuja taajuusvasteita Gaussin käyrään perustuvalla RBFN-sovitteella.

Kuvassa 4-6 on vaaleapaahtokahvin alkuperäisen 45°C:n taajuusvasteen vahvistuksen kuvaaja ja yhtälön (9) mukaiset ensimmäisen, toisen ja kolmannen asteen RBFN:llä mallinnetut vasteet. Kaikissa mallinnuksissa on käytetty edellisen taajuusvasteen mallinnuksen kertoimien arvoja alkuarvoina. Kertoimien polynomisovitteiden muodostuksessa on käytetty kolmannen asteen sovitetta. Kuvasta havaitaan, että ensimmäisen asteen sovitteella ei vahvistuksen kuvaajaa pystytä mallintamaan tarkasti. Toisen ja kolmannen asteen sovitteet taas toimivat huomattavasti paremmin ja näistä kolmannen asteen vielä hieman tarkemmin.



Kuva 4-6: Vaaleapahtokahvin 45°C:n alkuperäinen taajuusvaste ja eri astelukuisilla RBFN-sovitteella mallinnetut taajuusvasteen vahvistuksen kuvaajat.



Kuva 4-7: Vaaleapahtokahvin taajuusvasteiden kolmannen asteen RBFN-sovitteella mallinnetut kertoimien arvot ja niiden polynomisovite.

Kolmatta astetta suuremmat asteluvut on jätetty kuvasta pois kuvaajan selkeyttämisen vuoksi. Neljännen asteen sovite on kolmannen asteen kaltainen. Viidennen ja sitä suuremman asteluvun sovitteiden onnistuminen vaihtelee eri lämpötiloissa olevien taajuusvasteiden välillä. Niiden kertoimien arvoihin lämpötilan funktiona syntyy epäjatkavuuskohtia ja näin ollen kertoimen oikean arvon määrittäminen ei ole tarkka.

Kuva 4-7 sisältää kolmannen asteen RBFN-sovitteen kaikkien kertoimien arvot 35°C–55°C lämpötila-alueelta. Kaikki muut kertoimet muuttuvat tasaisesti lämpötilan mukana paitsi kerroin a_3 , jonka arvot heittelevät. Käytettäessä toisen asteen sovitetta kaikki

kertoimet muuttuvat tasaisesti lämpötilan funktiona. Neljännen asteen sovitteella syntyy kaikkiin kertoimiin epäjatkuvuuskohtia lämpötilan funktiona, vaikka mallinnuksessa on käytetty alkuarvona aina edellisen taajuusvasteen sovitetta. Taulukko 3 sisältää kolmannen asteen RBFN-sovitteiden kertoimien arvot lämpötiloissa 35°C, 45°C ja 55°C.

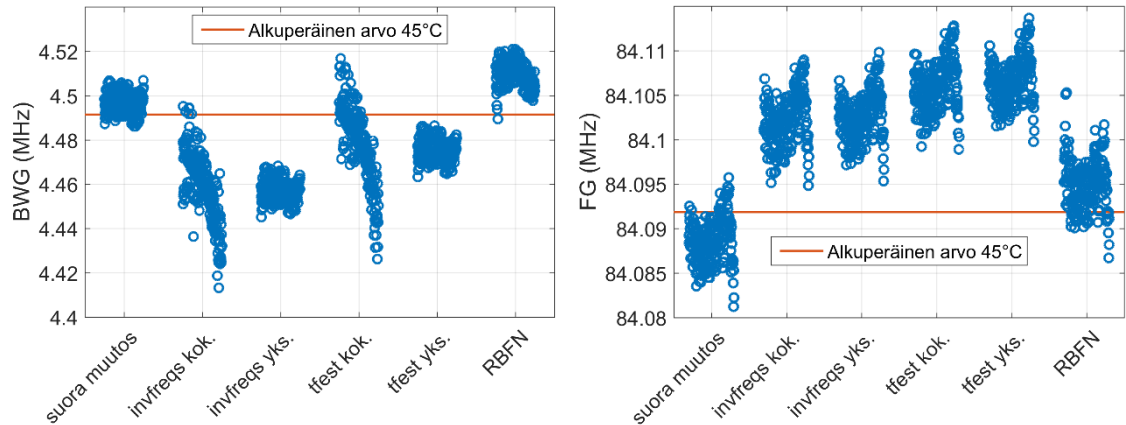
Taulukko 3: Vaaleapaahtoisin kahvin kolmannen asteen RBFN:n kertoimet.

Kerroin	<i>Gauss3</i> (35)	<i>Gauss3</i> (45)	<i>Gauss3</i> (55)
a_1	-2,233	-1,972	-1,765
a_2	-3,241	-2,972	-2,737
a_3	-1,938	-1,903	-1,847
b_1	$8,236 * 10^7$	$8,198 * 10^7$	$8,160 * 10^7$
b_2	$8,412 * 10^7$	$8,383 * 10^7$	$8,352 * 10^7$
b_3	$8,510 * 10^7$	$8,489 * 10^7$	$8,464 * 10^7$
c_1	$2,071 * 10^6$	$2,230 * 10^6$	$2,380 * 10^6$
c_2	$1,381 * 10^6$	$1,484 * 10^6$	$1,581 * 10^6$
c_3	$1,090 * 10^6$	$1,156 * 10^6$	$1,223 * 10^6$

4.4 Kompensointi

Tässä luvussa suoritetaan kompensointikokeita eri metodeja käyttäen. Vertailtavat menetelmät ovat luvussa 3.23 esitellyt suora muutos, *invfreqs*, *tfest* alkuarvolla ja Gaussin käyrään perustuva RBFN. Siirtofunktiometodeilla kompensointi on suoritettu laskemalla suhde kokonaisille siirtofunktioille (kok.) ja erillisenä metodina jokaiselle yksittäiselle kertoimelle erikseen (yks.). Siirtofunktiometodeilla on käytetty kolmen navan ja kahden nollan systeemeistä aina neljän navan ja nollan systeemeihin. RBFN-sovitteina on käytetty toisen, kolmannen ja neljännen asteen sovitteita. Tässä luvussa tarkastellaan esimerkkinä kolmen navan ja kahden nollan sekä kolmannen asteen kantafunktiosovitetta. Muita käytetyistä systeemeistä käsitellään tarkemmin luvussa 5 Mittaustuloksien tarkastelu. Kaikissa kokeissa kompensoitava taajuusvaste on aina mallinnettu samalla metodilla kuin millä malli on muodostettu ja kertoimille on käytetty kolmannen asteen polynomisovitetta. Kompensointi suoritetaan 35-55°C välille, mistä kaikki taajuusvasteet projisoidaan lämpötilaan 45°C.

Ensimmäisessä kokeessa kompensointi suoritetaan vaaleapaahtoisin kahvin mittasarjalle siten, että malli rakennetaan samasta mittasarjasta kuin mihin kompensointi tehdään. Toisessa kokeessa kompensointi suoritetaan vaaleapaahtoisin kahvin mittasarjalle tummapaahtoisin kahvin taajuusvasteista muodostetulla mallilla. Kolmannessa kokeessa vaaleapaahtokahvia kompensoidaan auringonkukkaöljyn taajuusvasteista muodostetulla mallilla. Kolmas koe on realistisin mittalaitteen todellista käyttöä ajatellen, koska kompensoitava ja mallina käytettävä neste eivät ole täysin samanlaiset.

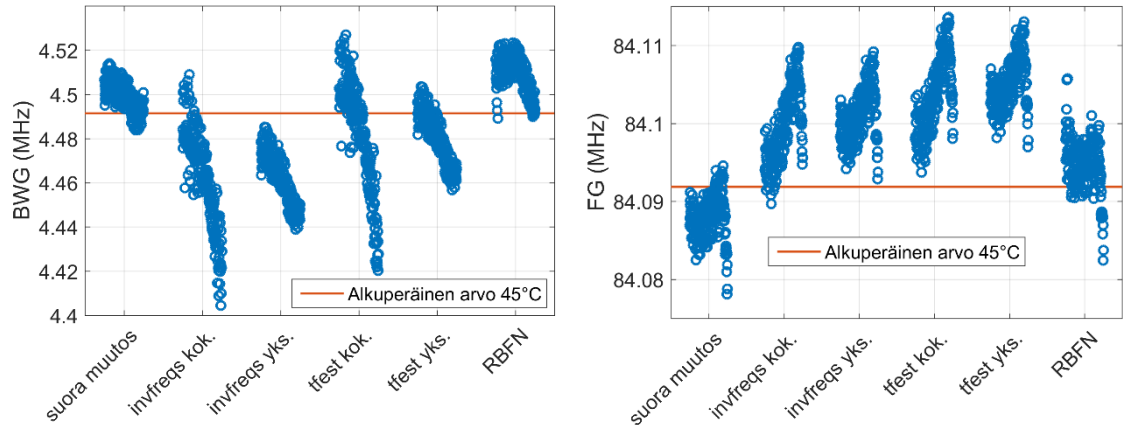


Kuva 4-8: Vasemmalla BWG ja oikealla FG-arvot vaaleapaahtoisien kahvin kompensoinnista 45°C:seen saman nesteen taajuusvasteista muodostetulla mallilla. Siirtofunktiosysteemeissä on kolmen napaa ja kaksi nollaa. RBFN on kolmannen asteen so-vite

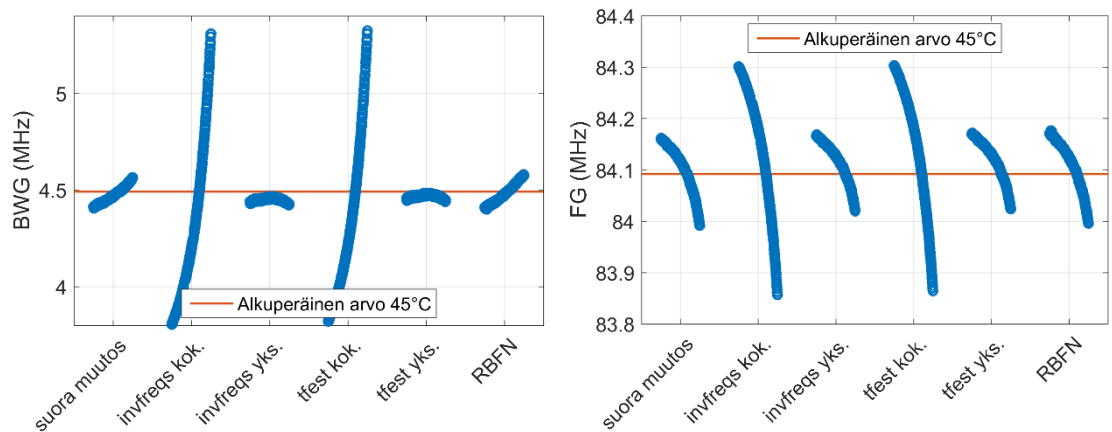
Kun kompensointi suoritetaan mallilla, joka on muodostettu samasta mittaussarjasta kuin kompensoitava taajuusvaste on, ei kompensoinnissa pitäisi odotusarvoisesti syntyä virhettä juuri lainkaan. Koska mallidata ja kompensoitava data ovat identtiset saadaan laskettua tarkka muutos lämpötilojen välillä. Kuva 4-8 on vaaleapaahtoisien kahvin taajuusvasteet 35°C-55°C lämpötila-alueelta kompensoituna 45°C:seen vaaleapaahtoisien kahvin mallilla. Vasemmalla on alkuperäinen ja kompensoitujen taajuusvasteiden BWG-arvot eri menetelmillä ja oikealla FG-arvot. Piirteiden alkuperäiset arvot on kuvattu punaisella vaakaviivalla. Lisäksi jakauman havainnollistamiseksi x-akselille on lisätty pieni kumulatiivisesti kasvava luku ja sen seurauksena jokaisen menetelmän vasemman puoleisin arvo on lämpötila-alueen alarajalta ja oikean puoleisin on lämpötila-alueen ylärajalta kompensoidun taajuusvasteen piirteen arvo.

Kun kompensoitava mittasarja ja mallin mittasarja ovat samoja, asetelma ei ole kovinkaan realistinen ajatellen reaalimaailman mittaustapausta. Todellisuudessa vaikka mitataan samaa prosessiainetta, syntyy aina pieniä eroja nesteiden välillä, etenkin koska käytettävä mittalaite on todella herkkä muutoksille. Kuva 4-9 esittää vaaleapaahtoisien kahvin taajuusvasteet kompensoituna väliltä 35°C-55°C lämpötilaan 45°C käyttäen mallina tummapaahtoisien kahvin taajuusvasteita. Vasemmalla on alkuperäinen ja kompensoitujen taajuusvasteiden BWG-arvot eri menetelmillä ja oikealla FG-arvot.

Aina mitattavasta nesteestä ei ole olemassa mittaussarjaa, missä lämpötila on ainoa muuttuva tekijä. Tällöin optimaalisen mallin muodostaminen on hankalaa ja mallina on käytettävä erilaisen nesteen taajuusvasteita. Kolmannessa kokeessa vaaleapaahtokahvin taajuusvasteita kompensoidaan auringonkukkaöljystä muodostetulla mallilla. Käytetyt nesteet ja niiden sähköiset ominaisuudet ovat hyvin erilaiset. Taajuusvasteen vahvistuksen kuvaajat samoissa lämpötiloissa ovat eri muotoisia ja muutokset lämpötilojen välillä ovat erilaiset. Selkein eroavaisuus on vahvistuksen piikin minimikohdan sijainti selkeästi eri



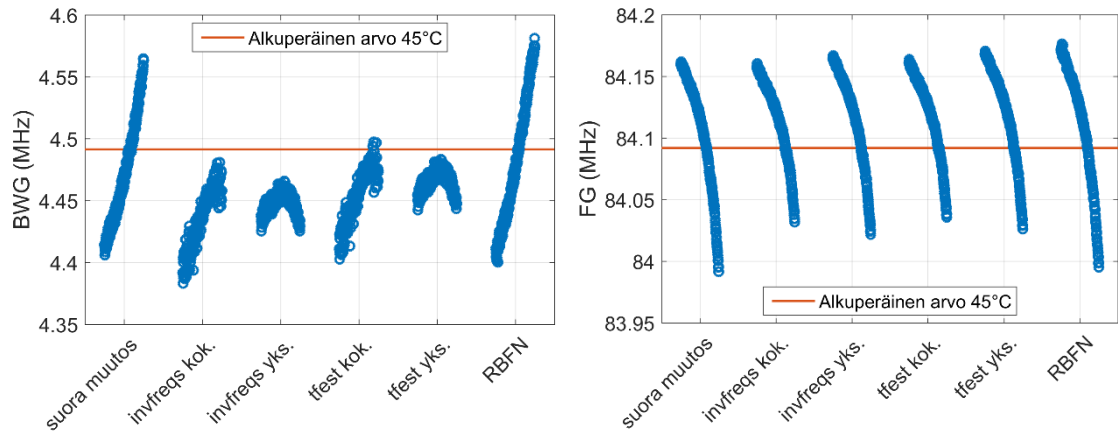
Kuva 4-9: Vasemmalla BWG ja oikealla FG-arvot vaaleapaahtoisen kompensoinnista 45°C:seen tummapaahtokahvin taajuusvasteista muodostetulla mallilla. Siirtofunktiosysteemeissä on kolmen napaa ja kaksi nollaa. RBFN on kolmannen asteen sovite



Kuva 4-10: Vasemmalla BWG ja oikealla FG-arvot vaaleapaahtoisen kompensoinnista 45°C:een auringonkukkaöljyn taajuusvasteista muodostetulla mallilla. Siirtofunktiosysteemeissä on kolmen napaa ja kaksi nollaa. RBFN on kolmannen asteen sovite

taajuuksilla. Näiden eroavaisuuksien vuoksi ainakin suora muutos metodi toimii odotusarvoisesti huomattavasti heikommin kuin kahdessa edellisessä kokeessa, koska se olettaa muutoksien olevan identtiset mallidatassa ja kompensoitavissa taajuusvasteissa.

Kuva 4-10 sisältää vaaleapaahtoisen kahvin taajuusvasteet kompensoituna väliltä 35°C-55°C lämpötilaan 45°C käyttäen mallina auringonkukkaöljyn taajuusvasteita. Vasemmalla on alkuperäinen ja kompensoitujen taajuusvasteiden BWG-arvot eri menetelmillä ja oikealla FG-arvot. Tuloksista havaittiin, että etenkin siirtofunktio menetelmien joilla käytettiin kokonaisia siirtofunktioita kompensoinnissa, tulokset eivät olleet hyviä. Menetelmän tarkempi analysointi paljasti, mikä erityisesti virhettä aiheutti. Ongelmaksi paljastui se, että mallin ja kompensoitavan taajuusvasteen piikin minimikohdan taajuuden arvot samassa lämpötilassa olivat kaukana toisistaan, mikä todettiin jo aikaisemmin vaa-



Kuva 4-11: Vasemmalla BWG ja oikealla FG-arvot vaaleapaahtoisen kompensoinnista 45°C:een auringonkukkaöljyn taajuusvasteista muodostetulla mallilla. Kompensoinnin laskennassa on käytetty taajuusvasteensiirto ominaisuutta. Siirtofunktiomenetelmällä on esitetty kolmen navan ja kahden nollan systeemit

leapaahtokahvista ja auringonkukkaöljystä mitatun taajuusvasteen suurimmaksi eroavaisuudeksi. Menetelmä ei pysty siirtämään taajuusvastetta riittävän tarkasti eri taajuudelle, koska napojen ja nollien arvot saavat hyvin erilaisia lukuarvoja.

Ongelma pyrittiin ratkaisemaan siirtämällä kompensoitavan mittauksen taajuusvasteen vahvistuksen kuvaajan piikin minimikohta samalle kohtaa, kuin mitä se oli mallista samassa lämpötilassa muodostetussa taajuusvasteessa kompensoinnin ajaksi. Taajuusvasteen muotoihin ei vaikutettu millään tavalla, ainoastaan taajuusakselia siirrettiin ja kuvaa- jaa siirrettiin sellaisenaan alas- tai ylöspäin. Hypoteesina oli, että tällä menettelyllä navat ja nollat saisivat lukuarvoja lähempää toisiaan mallissa ja kompensoitavassa taajuusvas- teessa ja sen seurauksena kompensointi olisi tarkempi. Kompensoidun taajuusvasteen taa- juusakseli palautettiin alkuperäiseksi ja siirto alas- tai ylöspäin kumottiin saman suurui- sella siirrolla vastakkaiseen suuntaan. Taajuusakselin palautus takaisin alkuperäiseksi on oleellista, koska jokaiselle taajuusvasteelle siirron suuruus on erilainen ja ilman palau- tusta alkuperäiseksi laskettavat FG-arvot eivät ole sellaisia, kuin ne olisivat olleet ilman siirtämistä.

Kuvassa 4-11 on vaaleapaahtoisen kahvin piirteiden arvot kompensoiduista taajuusvas- teista väliltä 35°C-55°C lämpötilaan 45°C käyttäen mallina auringonkukkaöljyn mittaus- sarjaa ja siirtämällä taajuusvasteita edellä esitetyllä tavalla. Vasemmalla on alkuperäinen ja kompensoitujen taajuusvasteiden BWG-arvot eri menetelmillä ja oikealla FG-arvot. Kuvasta havaitaan, että siirtofunktiomenetelmien tulokset ovat selvästi parempia, kuin mitä ne olivat ilman kompensoitavien taajuusvasteiden siirtämistä eri taajuuksille. Kah- teen ensimmäiseen kokeeseen mittauksensiirtomenettelyllä ei ole vaikutusta, koska kom- pensoitava taajuusvaste ja mallin taajuusvasteet olivat valmiiksi hyvin lähellä toisiaan.

5. MITTAUSTULOKSIEN TARKASTELU

Tässä luvussa tarkastellaan suoritettujen kompensointikokeiden tuloksia ja vertaillaan eri malleja. Luvussa 5.1 tarkastellaan eri mallinnusmetodien onnistumista kompensoinnissa ja tarkkuutta eri asteisilla soviteilla. Luvussa 5.2 käsitellään eri kompensointimenetelmien toimivuutta kaikissa kolmessa eri kokeessa. Lopuksi vertaillaan eri menetelmien parhaiden kombinaatioiden eroja ja asetellaan ne järjestykseen BWG ja FG -arvojen tarkkuuden perusteella vertailtuna alkuperäisten taajuusvasteiden arvoihin.

5.1 Mallinnusmetodien vertailu

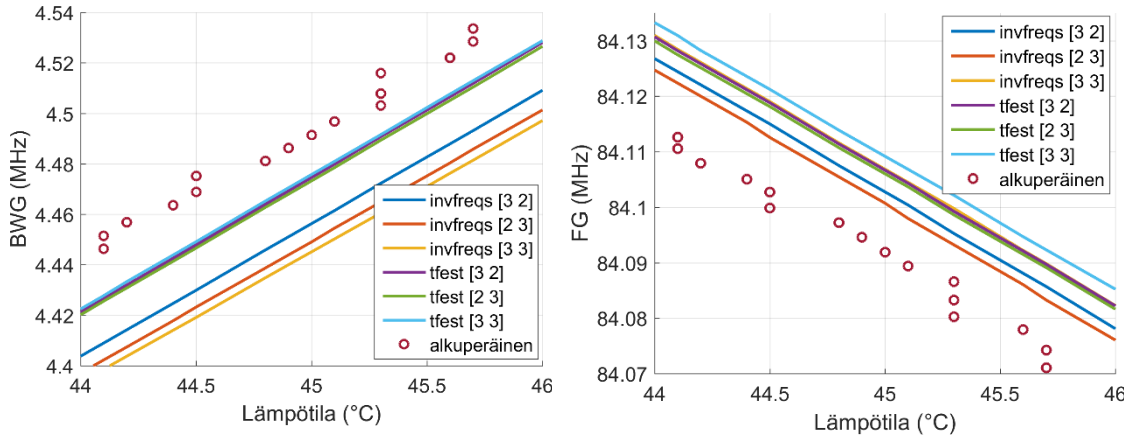
Kappaleessa 4.3 suoritettiin kokeita eri mallinnusmenetelmillä. Kokeissa mallinnettiin vaaleapahtokahvin taajuusvasteet 35°C-55°C lämpötila-alueelta *invfreqs*, *tfest* ja Gaussin soviteen menetelmillä 45°C:seen. Tässä kappaleessa vertaillaan eri metodien onnistumista mallinnuksessa. Mittarina vertailussa on piirteiden BWG ja FG -arvot verrattuna alkuperäisiin arvoihin. Kaikissa kokeissa kertoimien laskennassa on käytetty kolmannen asteen polynomisovitetta. Komennolla *tfest* koko mittaussarjan mallinnettaessa on käytetty alkuarvona aina edellistä mittauspisteen taajuusvastetta ja siten ensimmäisessä ei ole ollut alkuarvoa.

5.1.1 Siirtofunktiometodien mallinnus

Kuva 4-5 sisälsi 45°C taajuusvasteen *invfreqs*-komennolla mallinnetut vasteet. Kuvasta havaitaan, että yhden navan ja kahden nollan sekä kahden navan ja nollan systeemeillä taajuusvasteen mallinnus ei ole tarkka. Korkeammilla napojen ja nollien määrillä mallinnettu vaste on lähempänä alkuperäistä vahvistuksen kuvaajaa. Taulukko 4 sisältää alkuperäisen ja mallinnetun taajuusvasteen BWG ja FG -arvojen erotuksen kerrottuna sadalla.

Taulukko 4: Vaaleapahtokahvin BWG ja FG -arvojen erotus 45°C taajuusvasteeseen. Mallinnettuna *invfreqs*- ja *tfest*-komennoilla eri napojen ja nollien määrillä.

Napojen lkm.	Nollien lkm.	BWG <i>invfreqs</i> erotus *100	BWG <i>tfest</i> erotus *100	FG <i>invfreqs</i> erotus *100	FG <i>tfest</i> erotus *100
1	2	-617	-648,9	39,7	30,9
2	2	65,9	39,5	17,8	17,1
3	2	3,5	1,6	-1,1	-1,5
2	3	4,2	1,8	-0,9	-1,4
3	3	4,6	1,5	-1,5	-1,7
4	3	3,1	2	0,8	-0,7
3	4	3,4	2,4	0,5	-0,2
4	4	3,4	1,6	1,1	-0,9



Kuva 5-1: Vasemmalla BWG ja oikealla FG-arvot lämpötilan funktiona eri metodeilla mallinnettuna ja alkuperäisen taajuusvasteen arvot. Hakasulkeissa ensimmäinen luku on napojen ja toinen nollien lukumäärä.

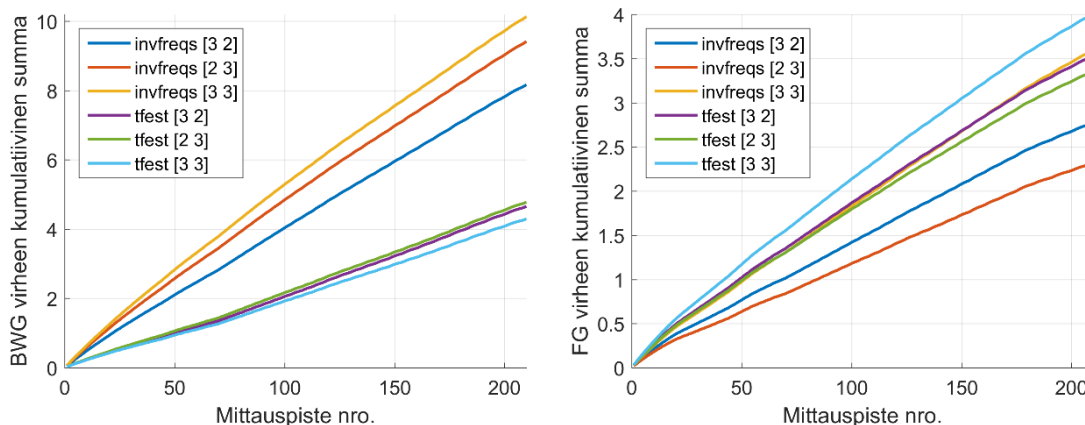
Taulukossa 4 tutkittava taajuusvaste on 45°C:n mittaus vaaleapaahtoisesta kahvista. Tämän taajuusvasteen alkuperäinen BWG-arvo on 4,491 ja FG-arvo 84,092. Taulukosta 4 havaitaan sama kuin kuvasta 4-5 aiemmin, eli esitetyistä siirtofunktiosysteemeistä kaksi ensimmäistä ei pysty kuvaamaan taajuusvastetta läheskään riittävän tarkasti. Loput sovitteista onnistuvat paremmin ja enää napojen ja nollien lukumäärän lisäämisellä ei päästä merkittävästi parempiin tuloksiin. Kuvassa 5-1 on molempien metodien eri napojen ja nollien kombinaatioilla BWG ja FG -arvot lämpötilan funktiona 45°C läheisyydestä. Kuvasta nähdään, että BWG:n osalta *tfest*-komennolla mallinnetut vasteet ovat tarkempia kuin *invfreqs*-komennolla mallinnetut. Esitetyillä napa ja nolla kombinaatiolla ei ole merkittävää vaikutusta sovitteen onnistumiseen *tfest*-komennolla. *Invfreqs*-komennolla mallinnetut ovat BWG:n osalta hieman heikompia ja parhaiten näistä onnistuu kolmen navan ja kahden nollan systeemi. Kuitenkin piirteen FG suhteen *invfreqs*-komennolla mallinnetut kolmen navan ja kahden nollan sekä kahden navan ja kolmen nollan systeemit ovat lähimpänä alkuperäisen taajuusvasteen arvoa. Erot eri kombinaatioiden välillä ovat kuitenkin kohtalaisen pieniä.

Piirteille voidaan laskea virhesummat alkuperäisen taajuusvasteen arvon ja mallinnetun erotuksena:

$$\sum_{i=1}^n |BWG_i - BWG_{mallinnettu(i)}|, \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^n |FG_i - FG_{mallinnettu(i)}|, \quad (13)$$

missä n on taajuusvasteiden lukumäärä. Kuva 5-2 sisältää virheen kumulatiivisen summan kuvaajan piirteestä BWG vasemmalla ja piirteestä FG oikealla eri menetelmillä laskettuna 35°C-55°C väliselle alueelle. Kuvassa suurin napojen tai nollien lukumäärä on



Kuva 5-2: Vasemmalla BWG ja oikealla FG virheen kumulatiivinen summa eri napojen ja nollien kombinaatioille.

kolme. Tätä suuremmilla lukumäärillä päästään hieman parempiin tuloksiin, mutta ne on jätetty pois kuvan selkeyttämiseksi.

Kuvasta nähdään, että virheiden kumulatiivisen summan kuvaajat ovat lähes suoria. Tämä kertoo siitä, että mallinnuksessa syntyvä virhe on systemaattinen kyseiselle menetelmälle. Toisin sanoen mallinnuksessa syntyy menetelmävirhe, joka on jokaiselle taajuusvasteelle lähes sama riippumatta mallinnettavan käyrän muodosta. Taulukko 5 sisältää yhtälöiden (12) ja (13) mukaisesti lasketut virhesummat laskettuna 35°C-55°C taajuusvasteille vaaleapaahtoisin kahvin kokeesta. Kyseisellä välillä on 210 taajuusvastetta.

Taulukko 5: Vaaleapaahtokahvin mallinnuksen BWG:n ja FG:n virhesummat 35°C-55°C väliseltä alueelta.

Napojen lkm.	Nollien lkm.	BWG virheen summa <i>invfreqs</i>	BWG virheen summa <i>tfest</i>	FG virheen summa <i>invfreqs</i>	FG virheen summa <i>tfest</i>
3	2	8,171	4,657	2,772	3,531
2	3	9,418	4,781	2,314	3,355
3	3	10,136	4,296	3,596	4,006
4	3	7,465	5,132	7,089	2,161
3	4	8,060	6,103	0,570	1,031
4	4	7,434	4,430	1,811	2,328

Kaikista kuvista ja taulukoista yhteenvetona voidaan sanoa, että kolmen navan ja kahden nollan systeemi on alinta astelukua, jolla taajuusvaste voidaan mallintaa järkevästi. Tätä suuremmilla napojen ja/tai nollien lukumäärillä päästää hieman parempiin tuloksiin, ei kuitenkaan kaikilla kombinaatioilla. Mallinnuksessa syntyy menetelmävirhe ja koska virhe säilyy lähes saman suuruisena koko mallinnettavalla lämpötila-alueella, voidaan virhe halutessa poistaa esimerkiksi vähentämällä vakio luku piirteen lukuarvosta.

5.1.2 RBFN-sovitteella mallinnus

Siirtofunktiomenetelmillä lisäämällä napojen ja/tai nollien lukumäärää saatiin tarkkuutta parannettua. Käytettäessä RBFN-malleja lisäämällä sovituksen astelukua saadaan kertoimien määrää lisättyä ja odotusarvoisesti mallinnuksen tarkkuutta parannettua. Taulukko 6 sisältää alkuperäisen taajuusvasteen ja yhtälön (9) mukaiset RBFN-sovitteella mallinnettujen vasteiden piirteiden erotuksen kerrottuna sadalla. Taulukossa on esitetty ensimmäisestä kuudenteen astelukuun olevat sovitteet.

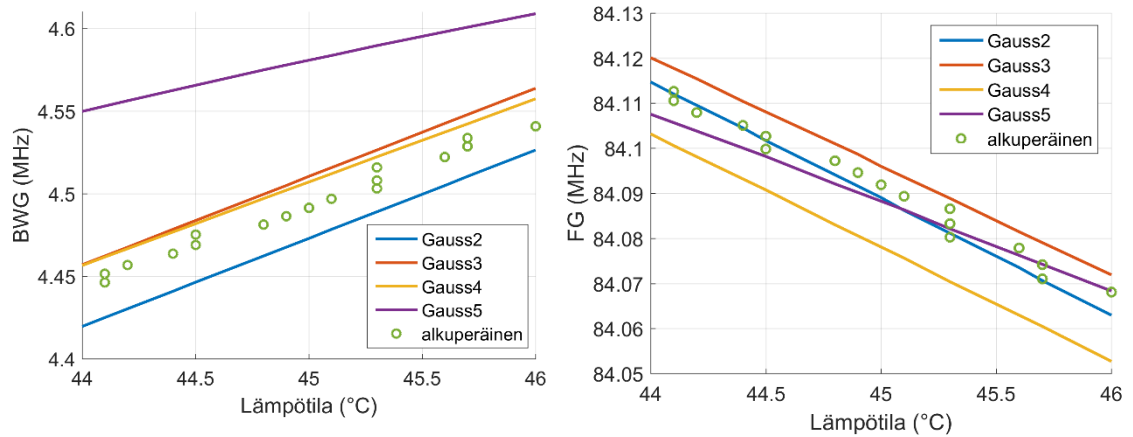
Taulukko 6: Alkuperäisen vaaleapaahtokahvin BWG ja FG -arvojen erotus 45°C taajuusvasteeseen. Mallinnettuna RBFN-sovitteen eri asteluvuilla.

asteluku	BWG erotus *100	FG erotus *100
1	2,347	50,168
2	1,857	0,281
3	-1,903	-0,411
4	-1,558	1,378
5	-8,930	0,361

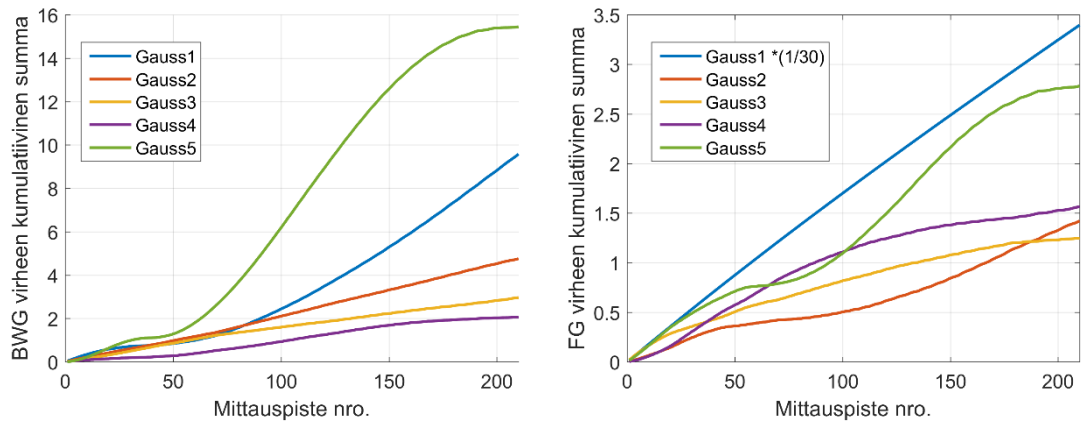
Erotuksien suuruudet ovat samaa suuruusluokkaa siirtofunktiometodien vastaavien kanssa, jopa hieman parempia. Viidennen asteen sovitteella BWG-arvo jää kuitenkin reilusti tavoitteesta. Tämä johtuu siitä, että viidennen ja sitä korkeamman asteluvun sovitteissa on nähtävissä suuren määrän kertoimia aiheuttamat ongelmat. Kun kertoimia on paljon, löytyy sovite alkuarvoista huolimatta kahden peräkkäisenkin taajuusvasteen välillä hyvinkin kaukaa toisistaan. Näin kertoimien arvoihin lämpötilanfunktiona syntyy epäjatkuvuuskohtia ja sovituksen laskemisesta tulee epätarkka. Kuvasta 4-6 havaittiin, että ensimmäisen asteen sovite ei ole riittävän tarkka, joka myös nähdään FG-arvon suuresta heitosta alkuperäiseen nähden.

Kuvassa 5-3 on alkuperäiset BWG ja FG -arvot ja eri asteisilla sovitteilla mallinnetuista kuvaajista lasketut arvot 45°C:n läheisyydessä. Kuvassa esimerkiksi *Gauss2* viittaa RBFN-sovitteeseen, missä on kaksi Gaussin kantafunktiota. Kuvaajasta on jätetty pois ensimmäisen asteen sovite kuvan selkeyttämiseksi. Kuvasta nähdään, että toisin kuin siirtofunktiopohjaisen mallinnuksen yhteydessä, Gaussin sovitteilla BWG ja FG -arvot eivät kulje saman suuntaisesti alkuperäisistä taajuusvasteista laskettujen kanssa vaan kulmakertoimet käyrissä eroavat tarkasteluvälillä. Viidennen asteen sovituksen BWG-arvo on erityisesti irrallaan muusta joukosta, mutta muuten mallinnetut piirteiden arvot ovat hyvin lähellä alkuperäisen taajuusvasteen vastaavia arvoja.

Kuva 5-4 sisältää kuvaajina yhtälöiden (12) ja (13) mukaiset virheiden summat kumulatiivisesti esitettynä. Ensimmäisen asteen FG-arvoja on skaalattu kertoimella 1/30. Kuvista havaitaan, että koko tarkasteluvälillä mallinnuksen onnistumisen tarkkuus vaihtelee ja si-



Kuva 5-3: Vasemmalla BWG ja oikealla FG-arvot lämpötilan funktiona eri asteisilla Gaussin sovitteilla mallinnettuna ja alkuperäisen taajuusvasteen arvot.

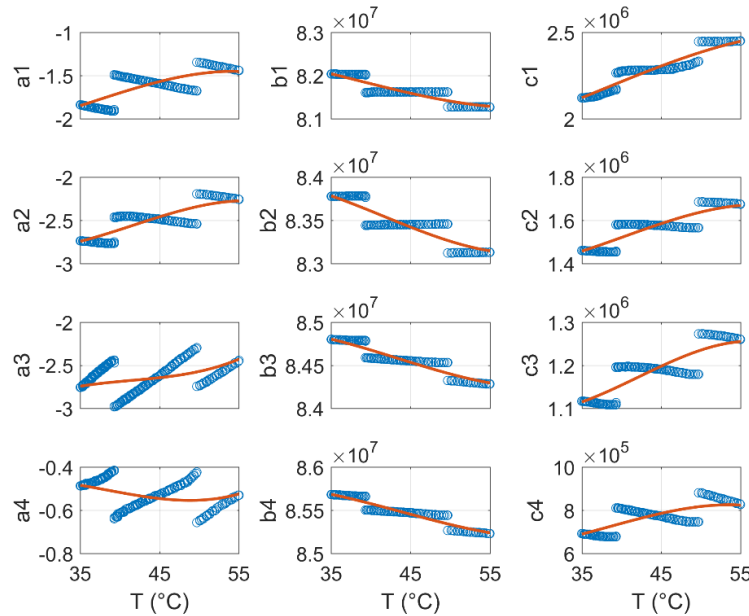


Kuva 5-4: Vasemmalla BWG ja oikealla FG virheen kumulatiivinen summa eri asteisilla Gaussin sovitteilla. Piirteen FG Gauss1 sovitetta skaalattu kertoimella 1/30.

ten kumulatiiviset virhesummat eivät ole suoria. Ensimmäisen ja viidennen asteen sovitteet eivät ole kovin tarkkoja. Sen sijaan toisen, kolmannen ja neljännen asteen sovitteet onnistuvat paremmin ja ovat keskenään melko tasaisia. Taulukossa 7 on sisältää yhtälöiden (12) ja (13) mukaisesti lasketut mallinnusvirheiden summat. BWG:n osalta neljännen asteen sovite ja FG:n osalta kolmannen asteen sovite saavuttavat pienimmän virheen summan, toisin sanoen niiden mallinnus on tarkin.

Taulukko 7: Vaaleapaahtokahvin mallinnuksen BWG ja FG virhesummat 35°C-55°C väliseltä alueelta RBFN-sovitteella.

asteluku	BWG virheen summa	FG virheen summa
1	9,574	101.9
2	4,752	1,421
3	2,965	1,246
4	2,062	1,563
5	15,45	2,783



Kuva 5-5: Vaaleapaahtokahvin taajuusvasteiden neljännen asteen RBFN-sovitteella mallinnetut kertoimien arvot ja niiden polynomisovite.

Yhteenvedona RBFN-sovitteen mallinnuksesta voidaan sanoa, että kolmannen ja neljännen asteen sovitteet toimivat parhaiten. Niillä päästään yli puolet pienempiin virhesummiin kuin siirtofunktiopohjaisilla mallinnusmenetelmillä. Neljännen asteen sovite toimi BWG-arvojen suhteen jopa paremmin, vaikka sen kertoimiin lämpötilan funktiona syntyy runsaasti epäjatkuvuuskohtia. Neljännen asteen sovitteen kertoimien arvot lämpötilan funktiona ovat nähtävissä kuvassa 5-5. Epäjatkuvuus kohtien syntyy vaikuttaa käytettävä algoritmi, joka etsii kertoimien arvoja aina edellisen taajuusvasteen kertoimien läheisyydestä. Tämän metodin heikkoutena on kuitenkin se, että virhe ei ole systemaattinen. Virheen suuruus vaihtelee taajuusvasteiden välillä ja siksi sitä ei voida vähentää mallinnuksesta vasteesta lasketusta piirteen arvosta yksinkertaisesti vakio-luvulla. Lisäksi tulee ottaa huomioon, että tällä metodilla vain taajuusvasteen vahvistuskäyrä mallinnetaan, kun taas siirtofunktiomallinnuksessa mallinnetaan koko taajuusvaste vaihe mukaan luettuna.

5.2 Kompensointimenetelmien vertailu

Napojen ja nollien lukumäärän tai RBFN-sovitteen asteluvun kasvattaminen tarkensi taajuusvasteen mallintamista tiettyyn rajaan asti. Mallinnuksen tarkkuus vaikuttaa oleellisesti myös kompensoinnin tarkkuuteen. Mallinnuksen ollessa epätarkka, ei malli kuvaa riittäväällä tarkkuudella lämpötilojen välistä muutosta taajuusvasteessa. Kaikissa kolmessa tehdyssä kokeessa kompensointiin saman nesteen taajuusvasteita, mutta mallina käytettävää nestettä vaihdeltiin. Kolmannessa kokeessa havaittiin, että siirtofunktiomenetelmien tulokset eivät olleet tarkkoja. Ongelma ratkaistiin siirtämällä kompensoitavan taajuusvasteen piikin minimikohta samalle kohdalle, kuin mitä mallista muodostetun taajuusvasteen

piikki on. Tällä menettelyllä päästiin tarkempiin tuloksiin. Tässä luvussa käsitellään tätä menetelmää käyttäen kompensoituja taajuusvasteita. Ensimmäisessä luvussa käsitellään *invfreqs*-menetelmät, toisessa *tfest* ja kolmannessa RBFN-sovitteet.

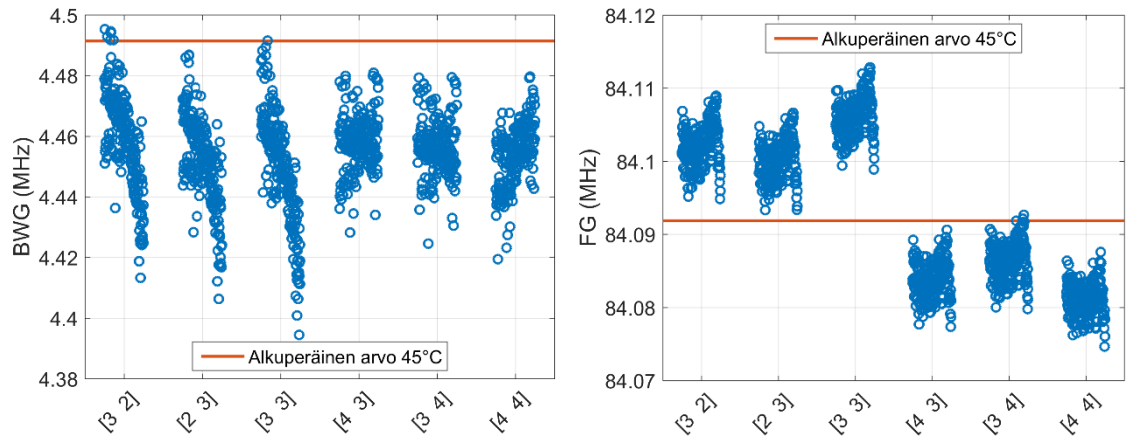
Kompensointien onnistumista vertaillaan varianssien perusteella. Varianssi, eli keskihajonnan neliö, kuvaa kompensoitujen taajuusvasteiden jakaumista koko joukon keskiarvon ympäristöön. Keskihajonta kertoo kuinka paljon tulokset poikkeavat keskimäärin joukon keskiarvosta. Varianssin ollessa suuri arvot poikkeavat paljon keskiarvosta ja päinvastoin varianssin ollessa pieni on poikkeama keskiarvosta myös pieni. Varianssi valittiin mittariksi koska se kertoo, kuinka lähelle toisiaan taajuusvasteet saadaan projisoitua. Yksittäisten taajuusvasteiden mallinnuksessa havaittiin, että etenkin siirtofunktiomenetelmillä syntyy systemaattinen virhe, joka on lähes saman suuruinen jokaiselle taajuusvasteelle. Varianssi ei ota huomioon, kuinka paljon kompensoitu joukko eroaa alkuperäisen taajuusvasteen arvosta, vaan vertailu tehdään kompensoidun joukon sisäisesti. Vertailu alkuperäiseen arvoon ei ole tarpeen, koska kaikki taajuusvasteet kompensoidaan, joten kompensoinnin katsotaan olevan onnistunut, jos kaikki taajuusvasteet saadaan siirrettyä yhteen läjään, riippumatta siitä missä se sijaitsee.

5.2.1 Lämpötilakompensointi *invfreqs*-menetelmillä

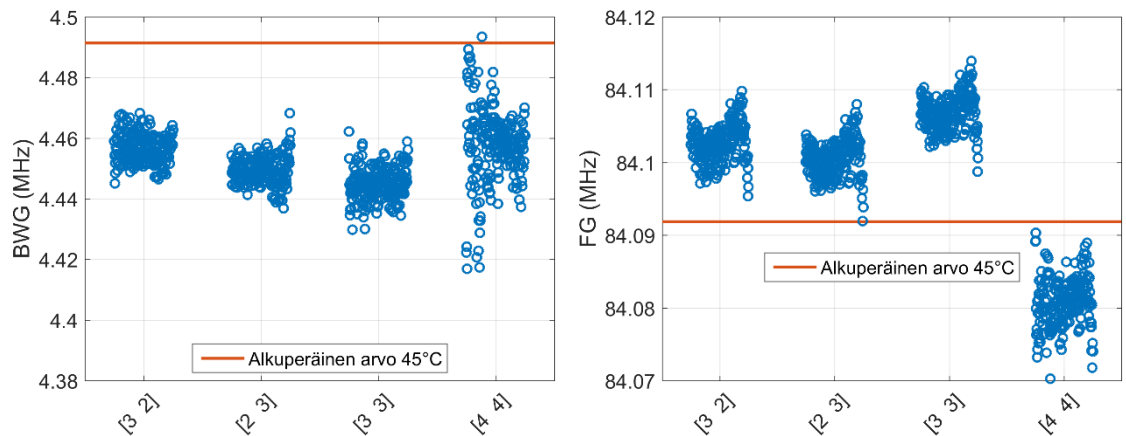
Luvussa 5.1.1 vertailtiin siirtofunktiomenetelmiä taajuusvasteen mallinnuksessa. Kokeissa havaittiin, että *invfreqs*-komennolla kolmen navan ja kahden nollan systeemi oli pienintä kertalukua, millä taajuusvaste pystyttiin mallintamaan alkuperäisen mukaiseksi. Osa tätä suuremmilla napojen ja nollien lukumäärällä olevista systeemeistä toimivat paremmin ja osa huonommin vertailtuna BWG ja FG -arvojen perusteella.

Siirtofunktiometodeilla voidaan kompensoinnin laskenta suorittaa joko kokonaisuudelle siirtofunktiolle tai jokaiselle navalle ja nolalle erikseen. Kuvissa 5-6 ja 5-7 on piirteiden arvot molemmilla menetelmillä vaaleapaahtaisen kahvin mittasarjan kompensointi samasta mittasarjasta muodostetulla mallilla, eli ensimmäisestä kokeesta. Kuviin on lisätty x-akselille pieni kumulatiivisesti kasvava luku jakauman havainnollistamiseksi. Vasemmassa laidassa on lämpötila-alueen alarajalta ja oikeassa laidassa alueen ylärajalta kompensoidun taajuusvasteen piirteen arvo. Jälkimmäisestä kuvasta on jätetty pois neljän navan ja kolmen nollan sekä kolmen navan ja neljän nollan systeemit, koska niiden BWG ja FG -arvot hajaantuivat todella laajalle alueelle.

Taulukko 8 sisältää BWG ja FG -arvojen varianssit eri napojen ja nollien kombinaatioilla samasta kompensointikokeesta. Taulukosta ja kuvista havaitaan, että paras kompensointitulokset vaaleapaahtokahvin kompensoinnissa samalla mittasarjalla saadaan laskemalla kompensoinnin suhdetta yksittäisille navoille ja nolille kokonaisten siirtofunktioiden sijaan. Kolmea napaa ja nollaa korkeammilla määrillä kokonaisilla siirtofunktioilla kompensointi toimii paremmin, mutta tulokset ovat silti heikompia.



Kuva 5-6: Vasemmalla BWG ja oikealla FG -arvot kompensoiden 45°C:seen kokonaisilla siirtofunktioilla invfreqs-komennolla. Hakasulkeissa ensimmäinen luku on nollien ja toinen napojen lukumäärä.



Kuva 5-7: Vasemmalla BWG ja oikealla FG-arvot kompensoiden 45°C:seen yksittäisten napojen ja nollien suhteella invfreqs-komennolla. Hakasulkeissa nollien ja napojen lukumäärä.

Taulukko 8: BWG ja FG varianssit 35°C-55°C väliseltä alueelta vaaleapaahtoisen kahvin kompensoinnista 45°C:seen samasta mittasarjasta muodostetulla mallilla invfreqs-komennolla.

Napojen lkm.	Nollien lkm.	BWG varienssi invfreqs kok. $\cdot 10^{-4}$	BWG varienssi invfreqs yks. $\cdot 10^{-4}$	FG varienssi invfreqs kok. $\cdot 10^{-5}$	FG varienssi invfreqs yks. $\cdot 10^{-5}$
3	2	2,43	0,288	0,843	0,713
2	3	2,03	0,287	0,774	0,667
3	3	3,28	0,385	0,801	0,678
4	3	0,885	410	0,687	40,7
3	4	0,891	12,2	0,665	1,95
4	4	1,04	1,57	0,578	1,20

Taulukko 9 sisältää *invfreqs*-metodin varianssit toisesta kompensointikokeesta, missä vaaleapaahtokahvin taajuusvasteita kompensoitiin tummapaahtokahvilla. Tässä kokeessa parhaaseen tulokseen päästään käyttämällä kompensoinnissa kolmea napaa ja nollaa sekä laskemalla käyttäen yksittäisiä napoja ja nollia. Myös käyttäen laskennassa kokonaisia siirtofunktiota kolmella suurinta astelukua olevalla systeemillä päästään tasaisen hyviin tuloksiin.

Taulukko 9: BWG ja FG varianssit 35°C-55°C väliseltä alueelta vaaleapaahtoisen kahvin kompensoinnista 45°C:seen tummapaahtoisen kahvin mallilla *invfreqs*-komennolla.

Napojen lkm.	Nollien lkm.	BWG varianssi <i>invfreqs</i> kok. $\cdot 10^{-4}$	BWG varianssi <i>invfreqs</i> yks. $\cdot 10^{-4}$	FG varianssi <i>invfreqs</i> kok. $\cdot 10^{-5}$	FG varianssi <i>invfreqs</i> yks. $\cdot 10^{-5}$
3	2	4,70	1,36	2,17	1,11
2	3	3,70	2,71	1,67	1,20
3	3	5,65	0,470	1,77	0,870
4	3	1,04	1204	1,69	107
3	4	1,13	66,1	1,69	7,07
4	4	1,09	5,54	1,24	4,80

Taulukossa 10 on BWG ja FG -arvojen varianssit *invfreqs*-komennolla mallinnetusta kolmannesta kokeesta, missä vaaleapaahtoista kahvia kompensointiin auringonkukkaöljystä tehdyllä mallilla. Ylivoimaisesti parhaaseen tulokseen tässä kokeessa *invfreqs*-komennolla päästään käyttämällä kolmea napaa ja kahta nollaa sekä laskemalla käyttäen yksittäisiä napoja ja nollia. Muiden kombinaatioiden varianssit ovat vähintään lähes kymmenen kertaa suurempia.

Taulukko 10: BWG ja FG varianssit 35°C-55°C väliseltä alueelta vaaleapaahtoisen kahvin kompensoinnista 45°C:seen auringonkukkaöljyn mittasarjasta muodostetulla mallilla *invfreqs*-komennolla.

Napojen lkm.	Nollien lkm.	BWG varianssi <i>invfreqs</i> kok. $\cdot 10^{-4}$	BWG varianssi <i>invfreqs</i> yks. $\cdot 10^{-4}$	FG varianssi <i>invfreqs</i> kok. $\cdot 10^{-5}$	FG varianssi <i>invfreqs</i> yks. $\cdot 10^{-5}$
3	2	5,73	0,847	106	141
2	3	6,08	465	108	401
3	3	4,66	43,4	109	210
4	3	15,1	47900	102	966
3	4	14,4	1160000	98,7	98500000
4	4	57900	5080	46800	927

Yhteistä kaikille kokeille on se, että kolmella ensimmäisellä systeemillä yksittäisten napojen ja nollien käyttäminen kompensoinnin laskennassa antaa paremman tuloksen kuin

kokonaisten siirtofunktioiden käyttö. Kolmella viimeisellä tilanne on päinvastoin. Kolmen navan ja kahden nollan systeemi ja niiden yksittäinen käyttö laskennassa on kaikki kolme kompensointikoetta huomioon ottaen paras kombinaatio *invfreqs*-komentoa käytettäessä. Se oli viimeisessä kokeessa ylivoimaisesti paras ja kahdessa ensimmäisessä toiseksi paras metodi verrattuna varianssien perusteella 35°C-55°C mittausalueelta projisoituna 45°C:seen.

5.2.2 Lämpötilakompensointi *tfest*-menetelmillä

Toinen siirtofunktiomenetelmä on *tfest*. Tässä luvussa käsitellään *tfest*-menetelmällä kaikkia kolme kompensointikoetta. *Tfest*-menetelmän ero edellä esitettyyn on se, että sillä voidaan määrittää navoille ja nolille alkuarvoja, joiden läheisyydestä sovitte halutaan löytyvän. Sekä mallin laskennassa, että kompensoitavien taajuusvasteiden mallinnuksessa on käytetty alkuarvoina aina edellisen taajuusvasteen napojen ja nollien arvoja. Ensimmäiselle taajuusvasteelle ei ole käytetty alkuarvoja.

Taulukossa 11 on *tfest*-komennolla mallinnettujen vasteiden piirteiden varianssit kokeesta, missä vaaleapahtokahvia kompensoitiin saman mittasarjan mallilla. Esitetyistä kolmella alinta kertalukua olevalla systeemillä ja laskemalla käyttäen yksittäisiä napoja ja nollija päästään selkeästi pienimpiin varianssin arvoihin. Kaikkien sistemien varianssit ovat samaa luokkaa, kuin mitä *invfreqs*-komennolla saatiin.

Taulukko 11: BWG:n ja FG:n varianssit 35°C-55°C väliseltä alueelta vaaleapahtoisen kahvin kompensoinnista 45°C:seen samasta mittasarjasta muodostetulla mallilla *tfest*-komennolla.

Napojen lkm.	Nollien lkm.	BWG varianssi <i>tfest</i> kok. * 10 ⁻⁴	BWG varianssi <i>tfest</i> yks. * 10 ⁻⁴	FG varianssi <i>tfest</i> kok. * 10 ⁻⁵	FG varianssi <i>tfest</i> yks. * 10 ⁻⁵
3	2	2,48	0,244	0,801	0,720
2	3	2,08	0,212	0,978	0,657
3	3	6,26	0,478	2,01	0,728
4	3	1,42	12060	1,01	6670000
3	4	0,819	24,9	0,655	4,03
4	4	1,38	2,85	1,70	12,7

Taulukossa 12 on *tfest*-komennolla mallinnettujen vasteiden piirteiden varianssit toisesta kokeesta, missä vaaleapahtokahvia kompensoitiin tummapahtoisen mittasarjan mallilla. Jälleen myös tässä kokeessa pienimpiin varianssin arvoihin päästään kolmella alinta kertalukua olevalla systeemillä jotka ovat kompensoitu käyttäen yksittäisiä napoja ja nollija. Kaikista pienimmät varianssin arvot saa kolmen navan ja nollan systeemi. Kolmen navan ja kahden nolla systeemillä saadaan vain hieman heikompi tulos piirteiden varianssien suhteen.

Taulukko 12: BWG ja FG varianssit 35°C-55°C väliseltä alueelta vaaleapaahtoisen kahvin kompensoinnista 45°C:seen tummapaahtoimesta mittasarjasta muodostetulla mallilla *tfest*-komennolla.

Napojen lkm.	Nollien lkm.	BWG varianssi <i>tfest</i> kok. * 10 ⁻⁴	BWG varianssi <i>tfest</i> yks. * 10 ⁻⁴	FG varianssi <i>tfest</i> kok. * 10 ⁻⁵	FG varianssi <i>tfest</i> yks. * 10 ⁻⁵
3	2	6,20	1,33	2,20	1,07
2	3	5,26	2,20	1,73	1,14
3	3	6,28	1,21	1,79	0,876
4	3	3,14	9120	2,00	6680000
3	4	2,18	59,2	1,57	7,61
4	4	3,09	5,38	1,53	16,7

Taulukossa 13 on *tfest*-komennolla mallinnettujen vasteiden piirteiden varianssit kokeesta, missä vaaleapaahtokahvia kompensoitiin auringonkukkaöljyn mittasarjan mallilla. Tässä kokeessa BWG:n varianssin osalta kolmen navan ja kahden nollan systeemi tuottaa selkeästi parhaimman tuloksen. Piirteen FG tulokset ovat tasaisemmat. Parhaiten suoriutuu neljän navan ja nollan systeemi. Kuitenkin ottaen huomioon molemmat piirteet voidaan kolmen navan ja nolla systeemi todeta suoriutuvan kokonaisvaltaisesti parhaiten tässäkin kokeessa.

Taulukko 13: BWG ja FG varianssit 35°C-55°C väliseltä alueelta vaaleapaahtoisen kahvin kompensoinnista 45°C:seen auringonkukkaöljyn mittasarjasta muodostetulla mallilla *tfest*-komennolla.

Napojen lkm.	Nollien lkm.	BWG varianssi <i>tfest</i> kok. * 10 ⁻⁴	BWG varianssi <i>tfest</i> yks. * 10 ⁻⁴	FG varianssi <i>tfest</i> kok. * 10 ⁻⁵	FG varianssi <i>tfest</i> yks. * 10 ⁻⁵
3	2	4,74	0,809	106	140
2	3	5,14	433	106	384
3	3	4,17	54,2	107	142
4	3	10,3	35000	95,0	87200000
3	4	11,0	105	100	229
4	4	8,85	1870	94,3	1710

Kaikille kolmelle kokeelle on yhteistä se, että kolmella ensimmäisellä systeemillä yksittäisten napojen ja nollien käyttö kompensoinnin laskennassa toimii paremmin. Taas kolmella viimeisellä systeemillä pienempään varianssin arvoon päästään käyttämällä kokonaisia siirtofunktioita laskennassa. Ottaen huomioon kaikki kolme koetta tasaisimman tuloksen antoi *tfest*-menetelmällä kolmen navan ja kahden nollan systeemi. Sillä lasketut varianssit arvot ovat joukon toiseksi pienimmät kaikissa kolmessa kokeessa. Tällä systeemillä varianssien arvot ovat lähes samat kuin *invfreqs*-menetelmällä lasketut.

5.2.3 RBFN-sovitteella kompensointi

Kolmas menetelmä tässä työssä taajuusvasteen mallintamiseksi on Gaussin käyrään perustuva RBFN-sovite. RBFN-sovite on polynomiyhtälö, joten sillä ei voida mallintaa koko taajuusvastetta, eli vahvistusta ja vaihesiirtoa, yhdellä sovitteella. Tämän työn kokeissa vain taajuusvasteen vahvistuksen kuvaaja on mallinnettu ja siitä on laskettu piirteille arvoja.

Taulukossa 14 on kaikkien kolmen kokeen varianssin arvot eri asteisilla RBFN-sovitteilla laskettuna. Kahdessa ensimmäisessä kokeessa pienimmät varianssit arvot saadaan toisen asteen sovitteella. Kolmannessa kokeessa paras tulos saadaan neljännen ja toiseksi paras toisen asteen sovitteilla. On huomion arvoista, että kaikissa kokeissa saadaan ensimmäisen asteen sovitteella kohtalaisen hyviä tuloksia BWG osalta, mutta FG piirteen varianssi tällä sovitteella kasvaa kaikissa kokeissa suureksi. Sillä siis pystytään muoto mallintamaan oikeaksi, mutta taajuustasossa käyrän paikka on sivussa halutusta.

Parhaimmat tulokset ensimmäisestä ja toisesta kokeesta ovat samaa luokkaa kuin siirtofunktiomenetelmillä lasketut, mutta kolmannessa kokeessa varianssien arvot kasvavat parhaimmankin osalta selvästi suuremmiksi kuin siirtofunktiomenetelmillä. Kaikki kolme koetta huomioiden toisen asteen RBFN-sovite toimii kaikista esitetyistä parhaiten. Neljännen asteen sovite on kaukana halutusta kahdessa ensimmäisessä kokeessa, vaikkakin onnistuu hyvin viimeisessä.

Taulukko 14: BWG ja FG varianssit 35°C-55°C väliseltä alueelta kompensoituna 45°C:seen RBFN-sovitteella kolmesta eri kokeesta.

	asteluku	BWG varianssi * 10 ⁻⁴	FG varianssi * 10 ⁻⁵
Koe 1	1	0,646	119
	2	0,215	0,634
	3	0,393	0,811
	4	140	9,24
	5	4530	64,2
Koe 2	1	0,840	119
	2	0,357	0,740
	3	0,791	1,23
	4	53,3	20,4
	5	2820	684
Koe 3	1	22,8	341
	2	20,4	207
	3	26,4	226
	4	8,46	184
	5	1430	762

5.2.4 Jokaisen menetelmän parhaiden vertailu

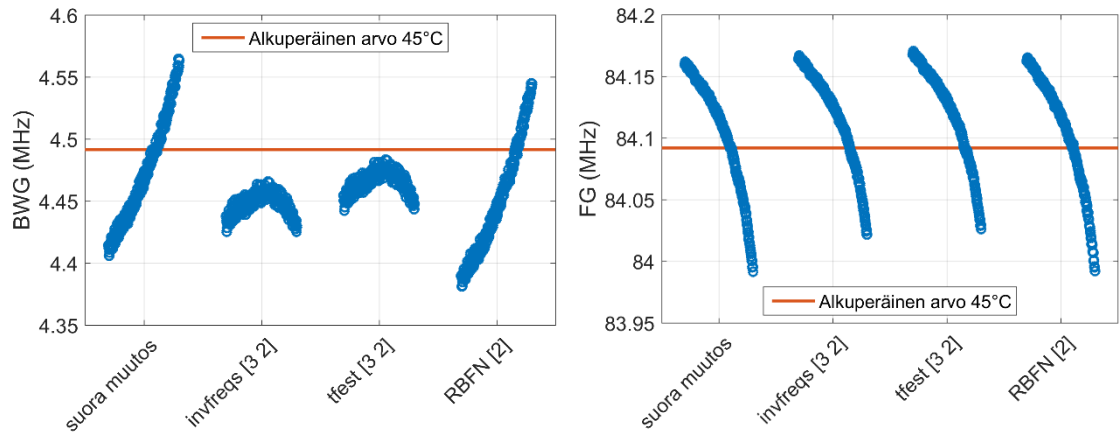
Tässä luvussa vertaillaan *invfreqs*, *tfest* ja RBFN -sovitteiden parhaimpia kombinaatioita. Lisäksi vertailuun otetaan mukaan niin sanottu suora muutos, eli kompensointi lasketaan mallidatasta suoraan piirteen muutoksen suuruuden perusteella. Siirtofunktiomenetelmillä pienimmät varianssien arvot saatiin kolmen navan ja kahden nollan systeemeillä, joilla käytettiin yksittäisiä napoja ja nollia kompensoinnin laskennassa. RBFN-sovitteista parhaaksi valikoitui toisen asteen sovite.

Taulukko 15 sisältää kaikkien menetelmien parhaiden kombinaatioiden varianssit BWG ja FG -piirteistä. Kompensaatio on tehty väliltä 35°C-55°C 45°C:seen. Kahdessa ensimmäisessä kokeessa kovinkaan suuria eroja menetelmien välillä ei synny. Kolmannessa kokeessa siirtofunktiomenetelmät suoriutuvat kompensoinnista huomattavasti paremmin. BWG:n varianssien arvot kolmannessa kokeessa suoran muutoksen ja RBFN-sovitteella ovat yli kaksikymmentä kertaa suuremmat, kuin siirtofunktiomenetelmillä. Myös FG:n varianssin arvot ovat lähes puolitoistakertaiset.

Taulukko 15: BWG ja FG varianssit 35°C-55°C väliseltä alueelta kompensoituna 45°C:seen eri menetelmillä.

	menetelmä	BWG varianssi * 10 ⁻⁴	FG varianssi * 10 ⁻⁵
Koe 1	suora muutos	0,216	0,625
	<i>invfreqs</i> [3 2]	0,288	0,713
	<i>tfest</i> [3 2]	0,244	0,720
	RBFN [2]	0,215	0,634
Koe 2	suora muutos	0,443	0,770
	<i>invfreqs</i> [3 2]	1,36	1,11
	<i>tfest</i> [3 2]	1,33	1,07
	RBFN [2]	0,357	0,740
Koe 3	suora muutos	18,0	200
	<i>invfreqs</i> [3 2]	0,847	141
	<i>tfest</i> [3 2]	0,809	140
	RBFN [2]	20,4	207

Kuvassa 5-8 on edellä esitetyillä metodeilla lasketut BWG ja FG -arvot kolmannesta kokeesta ja alkuperäisen taajuusvasteen vastaava arvo. Kuvasta nähdään, että *tfest*-menetelmällä tarkimmin kompensoidut arvot ovat lähempänä oikeaa arvoa, kuin *invfreqs*-menetelmän. Taulukossa 16 on parhaimpien metodien kompensoitujen taajuusvasteiden piir-



Kuva 5-8: Kaikkien menetelmien parhaiden kombinaatioiden BWG ja FG -arvot kokeesta kolme ja alkuperäisen taajuusvasteen arvo punaisella.

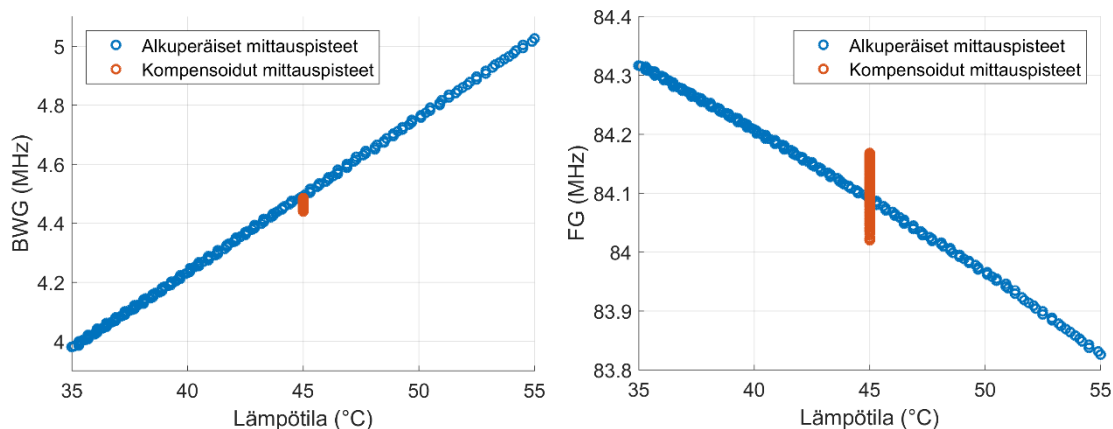
teiden vaihteluvälit ja välin suuruudet. Siirtofunktiometodien välille ei näilläkään mittareilla löydy merkittävää eroavaisuutta. Menetelmät ovat hyvin samanlaiset laskennallisesti, joten niiden yhtenevät tulokset ovat luonnollista.

Taulukko 16: Kaikkien menetelmien parhaiden kombinaatioiden BWG ja FG -arvojen vaihteluvälit kokeesta kolme.

Menetelmä	BWG vaihteluväli (MHz)	BWG vaihteluvälin suuruus (MHz)	FG vaihteluväli (MHz)	FG vaihteluvälin suuruus (MHz)
suora muutos	4,565 – 4,406	0,159	84,16 – 83,99	0,171
invfreqs	4,466 – 4,425	0,0406	84,17 – 84,02	0,145
tfest	4,483 – 4,442	0,0412	84,17 – 84,03	0,144
Gauss3	4,545 – 4,381	0,164	84,17 – 83,99	0,173

Siirtofunktiomenetelmien välille ei keskenään synny suurta eroa. Vaikka *tfest*-menetelmän kompensoidut taajuusvasteiden piirteiden arvot ovat hieman lähempänä oikeaa arvoa, ei se tee metodista merkittävästi parempaa. Kaikki taajuusvasteet kompensoidaan, joten alkuperäisen taajuusvasteen piirteiden arvolla ei ole suurta merkitystä. Merkittävämpää on se, että kompensoidut taajuusvasteet ovat mahdollisimman lähellä toisiaan. Tällöin virhe on kaikille saman suuruinen ja vertailu taajuusvasteiden välillä on luotettavaa.

Käytettäessä alkuarvoja sekä mallinlaskennassa että kompensoitavien taajuusvasteiden mallintamisessa tulee laskennasta raskaampaa ja sitä myöten hitaampaa. Koska vaativammalla laskennalla ei saavuteta merkittävästi parempaa tulosta, ei sitä kannata suorittaa. Jos halutaan valita yksittäinen metodi, niin kolmen navan ja nollan *invfreqs*-menetelmä on kaikki kokeet ja menetelmät huomioon ottaen paras. Kuitenkin tietyille taajuusvaste- ja mallipareille löydetään metodeja, joilla tulokset ovat parempia. Käytettävä malli ja metodi onkin valittava mitattavan nesteen perusteella parhaan mahdollisen lopputuloksen takaamiseksi.

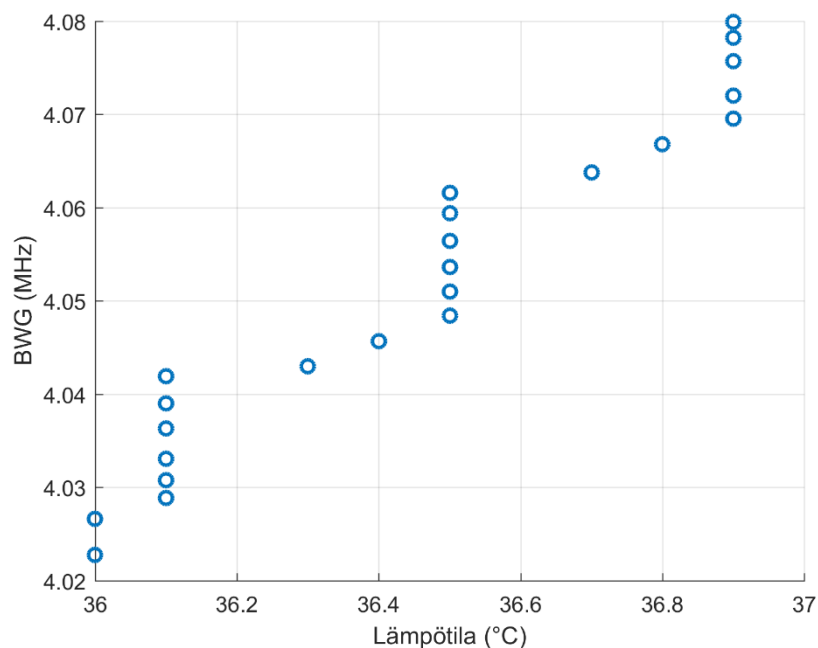


Kuva 5-9: *Invfreqs-menetelmällä kompensoidut BWG ja FG -arvot kolmannelta kokeesta ja alkuperäiset taajuusvasteiden piirteiden arvot.*

Kuva 5-9 esittää *invfreqs*-menetelmällä kompensoitujen taajuusvasteiden BWG ja FG -arvot ja alkuperäiset taajuusvasteiden piirteiden arvot. Kompensoidut BWG-arvot ovat hyvin pienellä vaihteluvälillä verrattuna alkuperäisten taajuusvasteiden piirteiden arvojen vaihteluväliin. Kompensoitujen taajuusvasteiden piirteiden vaihteluvälin 0,0406 MHz suuruinen muutos alkuperäisessä taajuusvastesarjassa tarkoittaa noin 0,75°C muutosta lämpötilassa, kun taajuusvasteet on kompensoitu väliltä 35°C-55°C lämpötilaan 45°C. Piirteen FG vaihteluvälin suuruuden mukainen muutos alkuperäisessä taajuusvastesarjassa taas tarkoittaa noin 6,1°C muutosta. Kompensointitulokset jättääkin toivomisen varaa myös tällä parhaalla metodilla laskettuna FG:n osalta. Virheen suuruus johtuu siitä, että taajuusalueet auringonkukkaöljyn ja vaaleapaahkokahvin taajuusvasteet olivat selvästi erillään. Esitetyt metodit eivät pysty siirtämään taajuusvasteen kuvaajaa riittävän tarkasti taajuuksilta toisille.

Suurin rooli kompensoinnin virheessä on sillä, että mallidata ei kuvaa täydellisesti kompensoitavan taajuusvasteen ominaisuuksia. Vaihtelut mittapisteiden välillä ovat todella pieniä, joten pienikin virhe näkyy selkeästi kompensoinnin onnistumisen tarkkuudessa. Tämä virhe voidaan luonnollisesti välttää käyttämällä mahdollisimman samanlaisesta mittasarjasta muodostettua mallia kuin mitä kompensoitava neste on, mielellään jopa samasta nesteestä mitattua. Mallin muodostuksessa käytettävässä mittasarjassa kuitenkin ainoa muuttuva tekijä tulee olla lämpötila. Samoilla metodeilla voidaan myös poistaa jonkin muun tekijän aiheuttama muutos nesteen sähköisissä ominaisuuksissa, kunhan mallia muodostettaessa käytetään mittasarjaa missä se on ainoa muuttuva tekijä.

Tässä luvussa taajuusvasteiden mallinnuksen yhteydessä käsiteltiin eri menetelmien systemaattisia virheitä. Mallinnusmenetelmän systemaattinen virhe toistuu kompensointia tehdessä kaksi kertaa. Ensin mallin muodostuksessa taajuusvasteet mallinnetaan ja kompensoinnin yhteydessä kompensoitava taajuusvaste mallinnetaan samalla menetelmällä. Tämä virhe voidaan poistaa halutessa vähentämällä piirteestä vakio, jos virhe on saman suuruinen koko tarkasteluvälillä.



Kuva 5-10: Vaaleapaahdokahvin taajuusvasteiden BWG-arvot lämpötilan funktiona.

Kuvassa 5-10 on vaaleapaahdokahvin taajuusvasteiden BWG-arvot lämpötilan funktiona 36°C-37°C lämpötila-alueelta. Mittalaitteen lämpötila-anturin resoluutio on 0,4°C. Mittalaitteen algoritmi ottaa neljä mittausta ja laskee niistä keskiarvon yhdelle taajuusvasteelle. Kuvasta havaitaan, että samalle lämpötilalle tulee monta taajuusvastetta, johtuen lämpötilamittauksen resoluutiosta. Vaikka lämpötila on pysynyt samana, on taajuusvasteen BWG-arvo muuttunut. Toisin sanoen nesteen sähköiset ominaisuudet ovat muuttuneet, vaikka lämpötila on näennäisesti vielä sama. Reaalimaailmassa lämpötilanmuutos on ollut tasaista, mutta anturin herkkyyden vuoksi se näkyy mittauksissa esitetyllä tavalla. Lämpötilamittauksen resoluutiosta syntyy merkittävä virhe vasteen kompensoinnin kannalta. Toleranssit taajuusvasteen mittauksessa ja vasteiden mallinnuksessa ovat todella pieniä, joten lämpötilan 0,4°C toleranssi on liian epätarkka. Lämpötilan käyttäytyminen on kuvatus kaltaista koko mitatulla lämpötila-alueella, mutta voimakkainta se on alhaisemmissa lämpötiloissa. Lämpötilamittauksen virhettä voidaan pienentää muodostamalla polynomisovite lämpötilasarjalle, jolloin muutoksesta tulee tasaista.

6. YHTEENVETO

Tämän diplomityön tarkoituksena oli muodostaa matemaattinen malli, jolla voidaan kompensoida lämpötilan vaikutus kolloidisten suspensioiden analysointilaitteen vasteesta. Työssä tutkittiin myös erilaisten nesteiden vasteita ja miten lämpötila vaikuttaa niihin. Työssä ei ollut tarkoitus ottaa kantaa siihen, miten lämpötila vaikuttaa nesteen sähköisiin ominaisuuksiin fysikaalisesti. Sen sijaan pyrittiin muodostamaan mittaussvasteiden avulla matemaattinen malli, joka kompensoisi lämpötilan muutokset mahdollisimman tarkasti. Tavoitteena oli, että muodostettu malli toimisi tarkasti myös, kun kompensoitava vaste ja mallissa käytetyt vasteet olisivat hyvin erilaisista nesteistä. Työssä tutkittiin vaalea ja tummapaahdokahvin sekä auringonkukkaöljyn vasteita lämpötilan funktiona. Valitut nesteet eivät täytä kolloidisen suspension määritelmää, mutta taajuusvasteen kannalta lämpötilanvaikutus niihin on samankaltainen kuin suspensioilla. Kompensointikokeita suoritettiin muodostamalla kaikista kolmesta nesteestä kompensointimalleja, joita testattiin poistamalla lämpötilavaikutus vaaleapaahdokahvin taajuusvasteista.

Mittalaitteen ulostulona saatiin taajuusvasteen vahvistuksen ja vaiheen arvot taajuuden funktiona. Ennen kompensoinnin suorittamista täytyi mitattu taajuusvaste mallintaa. Mallintamisessa käytettiin kolmea eri päämetodia: *invfreqs*, *tfest* ja Gaussin käyrään perustuva RBFN-sovite. Kaksi ensimmäistä ovat siirtofunktiomenetelmiä, joilla mallinnettiin koko taajuusvaste. RBFN on eräänlainen neuroverkko, jolla mallinnettiin ainoastaan taajuusvasteen vahvistuksen kuvaaja. Sillä olisi voitu mallintaa erikseen myös vaiheen kuvaaja, mutta koska kaikki tässä työssä esitetyt piirteet lasketaan vahvistuksen kuvaajasta olisi se ollut turhaa. Siirtofunktiomenetelmillä käytettiin kahdeksaa eri napojen ja nollien kombinaatiota aina yhden navan ja kahden nollan systeemeistä neljän navan ja nollan systeemeihin. RBFN-sovitteella kokeita suoritettiin ensimmäisestä viidenteen astelukuun olevilla sovitteilla.

Mallintaen yhtä lämpötilaa vastaava taajuusvaste saatiin metodista riippuen funktioiden kertoimien tai napojen ja nollien arvot tietyssä lämpötilassa. Mallintaen vasteita eri lämpötiloista saatiin näiden arvojen suuruudet lämpötilan funktiona. Kaikille yksittäisille kertoimille tai navoille ja nolille muodostettiin kolmannen asteen polynomisoviteet, jotka kokonaisuutena muodostivat lämpötilakompensoinnin matemaattisen mallin. Kertoimien, napojen ja nollien arvot halutussa lämpötilassa pystyttiin interpoloimaan polynomisovitteilta ja laskemalla kunkin arvo tietyssä lämpötilassa pystyttiin muodostamaan kyseisen lämpötilan taajuusvaste. Riippuen RBFN-sovitteen asteesta tai siirtofunktiomenetelmien napojen ja nollien määrästä kertoimien määrät ja siten tarvittavien polynomisovitteiden määrät vaihtelivat.

Siirtofunktiometodeilla mallintaessa havaittiin, että yksinkertaisin siirtofunktiosysteemi, jolla taajuusvaste saatiin mallinnettua oikean muotoiseksi, oli kolmen navan ja kahden

nollan systeemi. Tätä suuremmilla napoja ja/tai nollien määrillä mallinnus hieman parani tai huononi vertailtuna BWG ja FG -arvojen suuruuden perusteella alkuperäisiin vastaaviin verrattuna. Yhteistä kaikelle tälle ja suuremmille kombinaatioille oli metodista riippumatta se, että niillä BWG ja FG -arvoihin syntyi systemaattinen virhe verrattuna alkuperäisiin. Virheen suuruus oli lähes sama jokaisessa taajuusvasteessa koko tarkastellulla lämpötila-alueella, mutta sen suuruus vaihteli eri napojen ja/tai nollien määrillä. Lähimmäs alkuperäisiä BWG-arvoja päästiin *tfest*-menetelmällä ja FG-arvoja *invfreqs*-menetelmällä. RBFN-sovitteilla havaittiin, että ensimmäisen ja viidennen asteen sovitteet eivät soveltuneet taajuusvasteen vahvistuksen kuvaajan mallintamiseen. Sen sijaan toisen, kolmannen ja neljännen asteen sovitteet toimivat paremmin. RBFN-sovite menetelmillä syntynyt virhe ei ollut systemaattista, vaan se vaihteli taajuusvasteiden välillä.

Mallin muodostamisen jälkeen kompensoitava taajuusvaste täytyi myös mallintaa. Taajuusvasteen mallintamiseen käytettiin aina samaa metodologia, kuin mitä oli käytetty mallin muodostamiseen. Kompensoinnin suorittamiseksi mallista muodostettiin kaksi siirtofunktiota tai sovitetta riippuen käytettävästä menetelmästä. Toinen niistä oli kompensoitavan taajuusvasteen lämpötilassa ja toinen lämpötilassa mihin taajuusvaste haluttaisiin siirtää. Jokaiselle funktion kertoimelle laskettiin suhde halutun ja kompensoitavan taajuusvasteen lämpötilan arvon välille. Tällä suhteella kerrottiin mallinnetun taajuusvasteen vastaavaa arvoa. Siirtofunktioiden yhteydessä suhdetta laskettiin myös siirtofunktiolle kokonaisuena. Lopuksi siirtofunktiosta muodostettiin vielä taajuusvasteen kuvaajat. Muodostetuista kuvaajista laskettiin BWG ja FG -piirteet, joita vertailtiin alkuperäisten taajuusvasteiden vastaaviin arvoihin.

Kompensointikokeita suoritettiin kaikille menetelmille kolmea eri tyyppiä. Ensimmäisessä kompensoitava mittasarjana ja mallina käytettiin vaaleapaahtokahvia. Toisessa kokeessa malli muodostettiin tummapaahtokahvista ja sillä kompensoitiin vaaleapaahtokahvin taajuusvasteita. Kolmannessa kokeessa auringonkukkaöljy oli mallina ja sillä kompensoitiin jälleen vaaleapaahtokahvia. Kaikissa kokeissa taajuusvasteet 35°C-55°C väliltä kompensoitiin 45°C:seen.

Ensimmäisessä ja toisessa kokeessa tulokset olivat samankaltaiset johtuen siitä, että käytetyt nesteet olivat hyvin samanlaisia. RBFN-sovitteella ainoastaan toisen ja kolmannen asteen sovitteet antoivat hyviä tuloksia ja näistä toisen asteen sovite oli parempi molemmissa kahdessa ensimmäisessä kokeessa. Siirtofunktiomenetelmillä havaittiin, että yksittäisten napojen ja nollien käyttö kompensoinnissa antoi paremman tuloksen, kun napojen ja nollien maksimimäärä oli kolme. Tätä isommilla arvoilla kokonaisten siirtofunktioiden käyttö kompensoinnissa antoi paremmat tulokset, jotka olivat kuitenkin heikompia kuin pienemmillä määrillä ja *invfreqs*-komennolla.

Kolmas koe oli kokeista vaativin. Siinä malli ja kompensoitavat taajuusvasteet olivat keskenään hyvin erilaisista nesteistä. RBFN-sovitteella kolmannessa kokeessa neljännen as-

teen sovite oli selkeästi tarkin, vaikka sen tulokset kahdessa ensimmäisessä kokeessa olivat huonoja. Huomioiden kaikki kolme koetta, toisen asteen sovite on paras Gaussin-menetelmistä, vaikka se ei ollut tarkin viimeisessä kokeessa.

Kolmannen kokeen tulosten perusteella havaittiin, että siirtofunktiomenetelmien tulokset eivät olleet sen kovin tarkkoja. Menetelmän heikkoudeksi paljastui, että taajuusvasteen piikin siirtäminen taajuuden funktiona ei toiminut toivotulla tavalla. Ongelma ratkaistiin siirtämällä kompensoinnin ajaksi taajuusvasteen vahvistuksen kuvaajan piikin minimikohta samaan pisteeseen, kuin mitä se oli mallista samassa lämpötilassa muodostetussa taajuusvasteessa. Taajuusvasteen muotoihin ei vaikutettu millään tavalla. Kompensoinnin jälkeen taajuusakseli palautettiin alkuperäiseksi. Kahteen ensimmäiseen kokeeseen tällä menettelyllä ei ollut vaikutusta, koska kompensoitava taajuusvaste ja malli olivat valmiiksi hyvin lähellä toisiaan. Kolmannen kokeen tulokset sen sijaan paranivat huomattavasti.

Käyttäen parannettua menetelmää kolmannessa kokeessa havaittiin, että siirtofunktiomenetelmillä tulokset heikkenivät napojen ja nollien lukumäärien kasvaessa kolmen navan ja kahden nollan systeemistä. Käyttämällä kompensoinnin laskennassa yksittäisiä napoja ja nollija saatiin BWG-arvojen varianssille pienin arvo kyseisellä systeemillä. FG-arvojen varianssi ei tällä systeemillä ollut esitetyistä pienin, mutta koska BWG-arvojen varianssit kasvoivat monin kertaiseksi muilla systeemeillä, voidaan tätä systeemiä pitää parhaana siirtofunktiomenetelmänä.

Kahdessa ensimmäisessä kokeessa parhaimpiin tuloksiin päästään toisen asteen RBFN-sovitteella. Kuitenkin ero parhaimpiin siirtofunktiomenetelmiin on hyvin pieni. Kolmannessa kokeessa kolmen navan ja kahden nollan siirtofunktiosysteemillä päästää etenkin BWG-arvojen suhteen pienimpään varianssin arvoon. Kaikki kolme koetta ja kaikki esitetyt menetelmät huomioiden, on tämä kaikista paras, jos yksittäinen menetelmä valitaan. Kuitenkin tietyille taajuusvasteille voidaan löytää myös tarkempi menetelmä muista vaihtoehtoista. Käytettävä metodi ja sen aste onkin valittava mitattavien nesteiden perusteella.

Virhettä kompensointiin syntyy taajuusvasteen mallinnuksen yhteydessä. Siirtofunktiomenetelmillä se oli systemaattista ja RBFN-menetelmillä enemmän vaihtelevaa. Mallinnuksessa syntyvä virhe tulee kahteen kertaan, koska mallia varten taajuusvasteet ovat mallinnettu, ja lisäksi kompensoitava taajuusvaste täytyy mallintaa. Taajuusvasteen mallinnuksessa havaittiin myös ylimallinnuksesta johtuvia epäjatkuvuuskohtia, jotka aiheuttivat epätarkkuutta kompensointiin. Virherajojen puitteissa samaan lopputulokseen päästään useilla eri napojen ja nollien tai RBFN-sovitteiden kertoimilla, jos käytössä olevien muuttujien määrä kasvaa liian suureksi. Lisäksi lämpötilanmittauksen liian pieni resoluutio synnytti virhettä kompensointituloksiin. Suurin rooli kompensoinnin epätarkkuudessa kuitenkin on sillä, että malli ja kompensoitava taajuusvaste ovat eri nesteistä.

Jatkoa ajatellen pitäisi erilaisia nesteitä mitata laajemmin, jotta niiden erot lämpötilan funktiona selkeytyisivät. Lisäksi mittauksia tulisi suorittaa myös lämpötilan noustessa, jotta mahdollinen hystereesi nesteen sähköisissä ominaisuuksissa tulisi esiin. Tässä työssä ei otettu lainkaan kantaa siihen, että miten ja miksi nesteiden sähköisten ominaisuuksien muuttuvat lämpötilan mukana. Näiden ilmiöiden tarkempi tutkiminen mahdollistaisi lämpötilan vaikutusten tarkemman mallintamisen ja mahdollistaisi erilaisten metodien käyttämisen lämpötilan kompensoimiseksi.

LÄHTEET

- [1] E. Matijevic, "Access Science, Colloid," 2014. [Online]. Available: <http://www.accessscience.com/content/colloid/149100>. [Haettu 18. 10. 2016].
- [2] . L. L. Schramm, "Suspension," *Saskatchewan*, 2014.
- [3] J. Tuominen, Kolloidisten suspensioiden analysointimenetelmät, kandidaatintyö, Tampereen teknillinen yliopisto, 2015.
- [4] T. Yli-Hallila, Permittiivisyysmuutosten mittaaminen, diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, 2013.
- [5] T. Junnila, Huokoisen keraamin dielektrisyyden mallintaminen, diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, 2013.
- [6] S. Seppälä, Keraamien ainettarikkomaton karakterisointi taajuusvastemenetelmillä, diplomityö, Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto, 2013.
- [7] T. Salpavaara, M. Järveläinen, S. Seppälä, T. Yli-Hallila, J. Verho, M. Vilkkö, J. Lekkala ja E. Levänen, "Passive resonance sensor based method for monitoring particle suspensions," *Sensors and Actuators B: Chemical*, osa/vuosik. 219, pp. 324-330, 2015.
- [8] U. o. Cambridge, "Dissemination of IT for the Promotion of Materials Science (DoITPoMS)," [Online]. Available: <http://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/dielectrics/temperature.php>. [Haettu 8 11 2016].
- [9] E. E. Havinga, "The temperature dependence of dielectric constants," *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, osa/vuosik. 18, nro 2-3, pp. 253-255, 1961.
- [10] L. Gang, A. D. Abrahams ja J. F. Atkinson, "MEAN VELOCITY OF OVERLAND FLOW," *Earth Surface Processes and Landforms*, osa/vuosik. 21, nro 6, pp. 509-515, 1996.
- [11] P. F. Stenumgaard, "A simple impulsiveness correction factor for control of electromagnetic interference in dynamic wireless applications," *IEEE Communications Letters*, osa/vuosik. 10, nro 3, pp. 147-149, 2006.

- [12] K. Gupta, Parameter identification and control of dc motor using curve fitting technique, Patiala: Thapar University, 2014.
- [13] T. Ganley, D. Hung, G. Zhu ja X. Tan, "Modeling and Inverse Compensation of Temperature-Dependent Ionic Polymer–Metal Composite Sensor Dynamics," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, osa/vuosik. 16, nro 1, pp. 80-89, 2011.
- [14] J.-S. R. Jang, C.-T. Sun ja E. Mizutani, Neuro-Fuzzy and Soft Computing, Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 1997.
- [15] M. Järveläinen ja T. Yli-Hallila, "Collo," 9. 6. 2016. [Online]. Available: <http://www.collo.fi>. [Haettu 20. 10. 2016].
- [16] K. J. Åström ja R. M. Murray, Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers, Princeton University Press, 2016.
- [17] R. Isermann ja M. Münchhof, Identification of Dynamic Systems, London: Springer DorDrecht Heidelberg, 2011.
- [18] T. Irvine, "An Introduction to frequency response functions," College of engineering and computer science, Wright State University, Fairborn, Ohio, 2000.
- [19] R. C. Dorf ja R. H. Bishop, Modern Control Systems, Prentice Hall, 2000.
- [20] M. Järveläinen, T. Yli-Hallila, T. Salpavaara, J. Verho, M. Vilkkio ja E. Levänen, "Kolloidisten suspensioiden online-analysointi: tutkimuksesta liiketoimintaa," *Materia*, nro 5, pp. 54-57, 2015.
- [21] U. Tietze, C. Schenk ja E. Gramm, tekijä: *Electronic Circuits*, New York, NY, Springer , 2007, p. 824.
- [22] "Electronics Tutorials," AspenCore, Inc, [Online]. Available: <http://www.electronics-tutorials.ws/filter/band-stop-filter.html>. [Haettu 1 2 2017].
- [23] MathWorks, "Matlab 2015b Documentation," 2015. [Online]. Available: <https://se.mathworks.com/help/releases/R2015b/index.html>. [Haettu 20 10 2016].
- [24] "Paulig," Oy Gustav Paulig Ab, [Online]. Available: <http://www.paulig.fi/tuotteet/>. [Haettu 28 10 2016].